

MODELO SEMI-DINÁMICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE SISTEMAS RADIANTES DE TUBOS EMBEBIDOS

Marcos Hongn^{1,2}, Federico Montenegro², Camila Gea Salim¹, Silvina González^{1,2}

¹Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Grupo de Edificios Bioclimáticos, CONICET

²Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas, Dpto de Física, Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina
Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389. Email: mhongn@unsa.edu.ar

Recibido 14/08/2022; Aceptado 16/10/2022

RESUMEN.- Los sistemas de tubos embebidos con activación térmica (APES) pueden ser acoplados a fuentes/sumideros de baja entalpía para ofrecer reducciones en el consumo de energía, en los picos de demanda eléctrica y en los costos de la energía, asociados al acondicionamiento de edificios, sin resignar los niveles deseados de confort interior. Para aprovechar el potencial de estos sistemas, su comportamiento térmico debe ser estimado de manera precisa. Para ello, se propuso un modelo térmico semi-dinámico basado en resistencias y capacitancias (RC), capaz de simular la transferencia de calor en 2D y, además, el calor intercambiado por el agua del circuito interno del APES (3ra dimensión) mediante el conocido método ϵ -NTU. Se realizó un análisis comparativo entre datos medidos in-situ en un prototipo APES y los resultados de las simulaciones. Se determinaron valores de NRMSE (raíz del error cuadrático medio normalizado) de 9% para el flujo de calor del lado interior de la pared y de 17% para el flujo de calor transferido al agua. En cuanto a las temperaturas del agua a la salida del circuito y la de la superficie del tubo, el NRMSE es de 1% y 2%, respectivamente. Estos valores indican un buen desempeño del modelo propuesto.

Palabras clave: Sistemas radiantes de tubos embebidos, Modelo térmico semi-dinámico, Simulación y experimentación, Prototipo con sistema APES.

SEMI-DYNAMIC MODEL FOR THERMAL BEHAVIOR DETERMINATION OF ACTIVE PIPE-EMBEDDED SYSTEMS

ABSTRACT.- Active pipe-embedded systems (APES) can be coupled with low-grade enthalpy heat sources or sinks to offer reductions in energy consumption, peak electrical demand, and energy costs, regarding building conditioning, without lowering the desired level of inner comfort. To take advantage of the APES potential, its thermal behavior must be accurately predicted. A thermal semi-dynamic model based on resistances and capacitances (RC) was proposed. It can simulate the 2D heat transfer and, also, the heat exchange for the water loop in the APES (third dimension) through the well-known ϵ -NTU method. To evaluate the model performance, a comparative analysis between simulated data and in-situ measured data from an APES prototype was carried out. From the statistical analysis, NRMSE values (normalized root mean square error) of 10% and 11% were determined for the heat fluxes in the APES inner surface and for the water loop. For the output water and pipe wall temperatures, the NRMSE values were 1% for both. The mentioned values indicated a good model performance.

Keywords: Active pipe-embedded systems, semi-dynamic thermal model, Simulation and experimentation, APES prototype.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la superficie construida en edificios ha incrementado aproximadamente en un 65% desde el 2000, hasta llegar a casi 245 billones de m² en el año 2020. Al mismo tiempo, sin embargo, el uso medio de la energía por m² se ha reducido sólo en un ~25%, lo que significa que los avances en el ámbito de la eficiencia energética compensaron parcialmente el crecimiento de la superficie construida. Las mejoras en el rendimiento de la envolvente de los edificios son fundamentales para acercarse al objetivo de “Net Zero Emissions” para el escenario 2050, en cuanto a las reducciones de las cargas de calefacción y refrigeración (uso de energía por m²). Aunque todos los países deberán implementar códigos de construcción obligatorios en la próxima década para cumplir con las ambi-

ciones del plan Net Zero, la mayoría aún no los ha convertido en una prioridad política explícita. IEA, (2021).

En este sentido, las tecnologías de bajo consumo de energía con aplicaciones en el sector de la construcción ofrecen reducciones en el consumo, la demanda máxima y el costo de la energía sin afectar el nivel deseado de las condiciones de confort de los ocupantes. Entre las alternativas a los sistemas de refrigeración convencionales, los sistemas de tubos embebidos con activación térmica (APES, por sus siglas en inglés) emergen como una tecnología prometedora para proporcionar las condiciones interiores deseadas en cuanto a confort térmico y calidad del aire, (Leo Samuel et al., 2018).

Cuantificar precisamente las respuestas térmicas de los APES es

de gran importancia para la optimización de los sistemas de control. La elevada inercia térmica en los elementos que componen el APES da lugar a respuestas térmicas retardadas en el tiempo frente a cargas de calor/frío, con respecto a materiales de menor masividad. Esta característica del sistema, que con frecuencia forma parte de la estructura y la envolvente de los edificios, resulta en complicaciones adicionales para controlar las salidas térmicas de estos sistemas para lograr el confort térmico interior esperado, (Sourbron et al., 2009). Se espera que una estrategia de control confiable regule los parámetros del agua “enfriada” de suministro para mantener el ambiente interior dentro del rango de confort, evitar la condensación en las superficies radiantes y evitar el subenfriamiento o el sobrecalentamiento de espacios con baja ganancia de calor (en caso de que se use el mismo sistema hidráulico para la calefacción), Joe y Karava, (2019). Como lo indican Hassan y Abdelaziz (2020) en su trabajo de revisión, son varios los autores que abordan metodologías de implementación de controles predictivos (MPC) para garantizar estas condiciones. Estos enfoques introducen un alto requisito tanto en la exactitud como en la eficiencia del modelo. Además, es esencial la integración de los sistemas APES con las otras superficies del edificio para simulaciones a largo término, sobre todo en la etapa de diseño del sistema. Es por ello que, es necesario desarrollar modelos de transferencia de calor precisos y eficientes.

Se pueden obtener modelos de transferencia de calor fiables sin recurrir a fórmulas complejas y de difícil aplicación para diseñadores e ingenieros (modelos analíticos) o, modelos de gran exactitud, pero computacionalmente costosos y de difícil integración con softwares de simulación de edificios existentes (modelos numéricos de diferencias finitas y/o elementos finitos). Los modelos RC son redes térmicas de resistencias y capacitores, y son una opción simple y confiable para representar la transferencia de calor 2D, siempre que sean desarrollados con metodologías de alta fidelidad. Una metodología para el desarrollo de un modelo RC, que combina las características de los modelos RC existentes en la bibliografía, fue presentada en trabajos previos (Hongn et al. 2021, 2022).

En el presente trabajo, se implementa una metodología para la consideración de la tercera dimensión del problema de transferencia de calor en el sistema APES (dirección axial sobre el tubo embebido en el sistema constructivo). Para ello, en base a lo propuesto por Li et al. (2017), se incluye el método clásico ϵ -NTU para la determinación de la transferencia de calor en estado estacionario a lo largo del tubo. Este método es acoplado al modelo RC “umbrella” (desarrollado anteriormente), como una red térmica 2R1C. Para determinar el desempeño del modelo semi-dinámico propuesto, se realiza un análisis comparativo entre datos simulados y experimentales, los cuales han sido obtenidos del monitoreo de un sistema APES instalado en la pared norte de una casilla experimental en el campus del INENCO.

2. METODOLOGÍA

Para analizar el comportamiento térmico dinámico de un sistema APES se requieren de modelos de transferencia de calor precisos, y para una posible incorporación sobre los softwares de simulación energética de edificios, éstos deben ser simples de implementar e integrar. En base a esto, la metodología general seguida en el presente trabajo se resume en los siguientes pasos:

Paso 1: Desarrollo de un modelo numérico de referencia (o teórico). En este caso un modelo de Diferencias Finitas en el Dominio de la Frecuencia (FDFD) de la capa de hormigón con los tubos embebidos (capa principal). Se obtienen las respuestas térmicas en frecuencia para diferentes perturbaciones (condiciones de borde).

Paso 2: Desarrollo de un modelo RC dinámico para la capa principal del sistema APES (2D). Los parámetros de este modelo (resistencias y capacitores) son obtenidos mediante técnicas de optimización con algoritmos genéticos. La determinación de estos parámetros permite que el modelo RC genere las respuestas térmicas en frecuencia del modelo complejo FDFD.

Paso 3: Desarrollo de un modelo 2R1C a través del método estacionario ϵ -NTU para representar la transferencia de calor entre el tubo y el hormigón, considerando del recorrido del agua dentro de los tubos.

Paso 4: Desarrollo de un modelo semi-dinámico RC acoplado un modelo RC dinámico y el modelo estacionario 2R1C (ϵ -NTU). Otras capas de material pueden ser consideradas mediante redes térmicas 2R1C.

Los pasos mencionados se pueden representar en un diagrama de flujo de trabajo, como lo indica la figura 1. Los parámetros del modelo RC dinámico son calibrados mediante un método de optimización basado en algoritmos genéticos (AG). Los detalles de este proceso están descritos en (Hongn et al., 2022), donde se han abordado los pasos 1 y 2 de la metodología.

2.1. Modelo RC para el circuito de agua

Para determinar el calor intercambiado por el agua en su recorrido por el circuito embebido, se puede trabajar con un modelo térmico de 2 resistencias y 1 capacitor (2R1C) capaz de describir la relación entre la temperatura de entrada del agua T_{agIN} y la temperatura de la superficie del tubo T_p . Mediante un balance de energía sobre el circuito de agua se pueden establecer los parámetros de la red 2R1C, figura 2, utilizando el método de análisis de intercambiadores de calor ϵ -NTU.

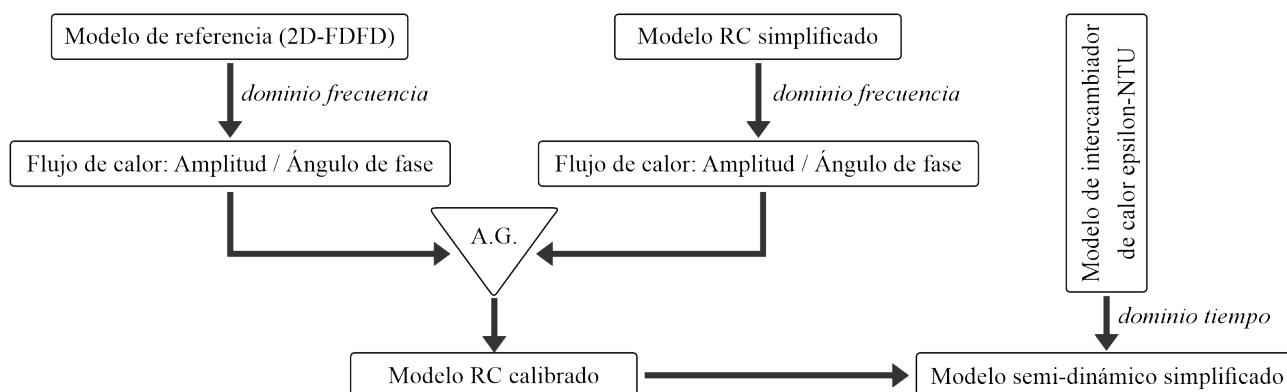


Fig. 1: Diagrama de flujo para la obtención del modelo RC semi-dinámico.

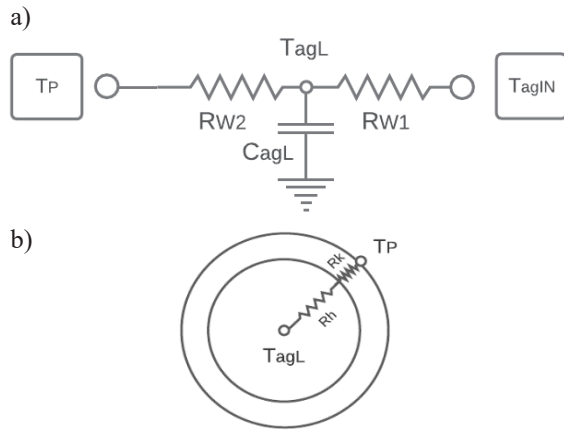


Fig. 2: a) Esquema 2RIC para representar la transferencia de calor del circuito de agua y b) representación de la transferencia de calor en dirección radial del tubo.

Al representar la temperatura del agua del circuito hidráulico embebido en la capa principal del APES con un valor medio T_{agL} , el balance de calor para el agua en el circuito se escribe como:

$$1) \quad C_{agL} \frac{dT_{agL}}{dt} = \dot{m} c_{p,ag} (T_{agIN} - T_{agOUT}) + \frac{(T_P - T_{agL})}{R_{W2}}$$

donde \dot{m} es el flujo másico de agua (kg/s) y $c_{p,ag}$ es su calor específico (J/kg-K).

La resistencia térmica R_{W2} es la resultante en serie de las resistencias convectiva (R_h) y conductiva (R_k), figura 2b, y C_{agL} es la capacitancia térmica del agua del circuito:

$$2) \quad R_{W2} \left(\frac{K}{W} \right) = \frac{1}{A_i h} + \frac{\ln \left(\frac{d_e}{d_i} \right)}{2\pi L k_t}$$

$$3) \quad C_{agL} \left(\frac{J}{K} \right) = 0.25\pi d_i^2 L \rho_{ag} c_{p,ag}$$

donde A_i es el área interna de tubo (m^2), h es el coeficiente convectivo entre el agua y la pared interna del tubo (W/m^2-K), d_e y d_i son los diámetros externo e interno del tubo (m), L es la longitud total del tubo dentro de la capa de hormigón, k_t es la conductividad térmica del tubo ($W/m-K$) y ρ_{ag} es la densidad del agua (kg/m^3).

En estado estacionario, el calor transferido hacia/desde el agua del circuito es igual al calor intercambiado entre la pared super-

ficial del tubo a T_P y el agua a T_{agL} , por lo que la Ec. (1) se escribe como:

$$4) \quad \dot{m} c_{p,ag} (T_{agIN} - T_{agOUT}) = \frac{(T_P - T_{agL})}{R_{W2}}$$

De acuerdo al método ϵ -NTU (Bergman et al., 2011), y considerando que la masa de hormigón circundante a los tubos se encuentra a la temperatura T_P en toda la longitud del intercambiador, la relación entre la temperatura de entrada del agua (T_{agIN}), la de salida (T_{agOUT}) y la temperatura de la superficie del tubo (T_P), puede ser expresada, en estado estacionario, a través de la definición de la efectividad ϵ del intercambiador de calor:

$$5) \quad \epsilon = \frac{T_{agIN} - T_{agOUT}}{T_{agIN} - T_P}$$

Bajo la suposición mencionada en el párrafo anterior, se puede determinar ϵ en función del número de unidades de transferencia NTU:

$$6) \quad \epsilon = 1 - e^{-NTU}, \quad NTU = (\dot{m} c_{p,ag} R_{W2})^{-1}$$

Sustituyendo Ecs. (5) y (6) en (4), se puede obtener:

$$7) \quad \frac{(T_{agIN} - T_P)}{1/(\epsilon \dot{m} c_{p,ag})} = \frac{(T_P - T_{agL})}{R_{W2}}$$

De acuerdo a la representación 2RIC indicada en figura 2a, la ecuación de balance de calor para el agua del circuito se puede escribir como:

$$8) \quad C_{agL} \frac{dT_{agL}}{dt} = \frac{(T_{agIN} - T_P)}{R_{W1}} + \frac{(T_P - T_{agL})}{R_{W2}}$$

donde $R_{W1} = (\epsilon \dot{m} c_{p,ag})^{-1} - R_{W2}$.

Las resistencias térmicas del modelo 2RIC son R_{W1} y R_{W2} (K/W).

2.2. Caso de estudio

Para evaluar el desempeño del modelo RC semi-dinámico, se monitoreó un prototipo APES instalado en una de las paredes de una casilla experimental del INENCO (Salta Capital), figura 3.

La casilla donde se integró el prototipo APES tiene dimensiones 3,0 m x 2,7 m y una altura de 2,5 m, figura 3a. Las paredes de la envolvente están compuestas por ladrillo hueco cerámico



Fig. 3: Pared con el sistema APES en casilla experimental del INENCO, a) vista exterior, b) vista interior de la distribución de los tubos y c) monitoreo sobre el tabique terminado.

de 0,12 m de espesor y revoque grueso del lado interno (0,02 m). El techo es de chapa galvanizada C24, cámara de aire de 0,20 m y cielo raso de polietileno expandido de 0,05 m. Mientras que el contrapiso es de hormigón de 0,10 m de espesor y 0,04 m de aislación térmica. Además, cuenta con una ventana con vidrio simple de 0,003 m y marco de madera (1 m x 1 m) y una puerta de madera (0,84 m x 1,00 m x 0,05 m) Sobre la pared norte (figura 3a) se integró el prototipo APES, adhiriendo sobre el lado interior una manta de aislación de 0,01 m y un circuito para el recorrido del agua a través de un tubo en forma de serpentin, con una separación de 0,20 m (figura 3b). Este circuito se embebió en un tabique de hormigón de 0,10 m de espesor (3,0 m x 2,5 m). El equipamiento utilizado para la medición se lista en la Tabla 1.

La figura 3c muestra la superficie interior del prototipo y el posicionamiento de algunos sensores para registro de temperaturas (en el interior y la superficie del tabique) y flujo de calor superficial. Si bien se cuenta con medidas para la situación de verano, cuando el prototipo opera con agua “fría”, no se dispone de un registro prolongado de datos con el sistema operando en las condiciones de trabajo. En cambio, si se cuenta con un monitoreo continuo para la situación de invierno, con el prototipo

operando en modo “calentador”. Es por ello que se analizarán los datos correspondientes al periodo entre el 22 y 26 de agosto de 2022.

2.3. Modelado del prototipo APES del INENCO

Para representar la situación del prototipo descrito en la sección anterior, los parámetros del modelo RC tipo “umbrella” fueron recalibrados (pasos 1 y 2 de la metodología) según las características medidas del tabique de hormigón (conductividad térmica de 0,9 W/m-K, calor específico de 890 J/kg-K y densidad de 2300 kg/m³). En base a las diferentes capas de la pared estudiada, figura 4a, se configuró el modelo RC semi-dinámico indicado en figura 4b.

Los parámetros RC de la capa principal (hormigón de 0,10 m), han sido ajustados mediante los pasos 1 y 2 de la metodología y se han obtenido los valores indicados en la Tabla 2.

Como puede observarse de la figura 4b, las capas complementarias del sistema: revoque (0,02 m) y ladrillo (0,12 cm), se han modelado como redes RC simples del tipo 2R1C. Mientras que la capa de aislación se ha representado mediante una única

Tabla 1: Equipamiento y sensores utilizados en el marco experimental.

Instrumento	Descripción	Características
Field Logger NOVUS	Adquisidor de datos	8 canales para entradas analógicas (termocuplas), 24 bits de resolución (convertor A/D)
HOBO U12-006	Adquisidor de datos	12 bits (convertor A/D), resolución 0.6 mV
Sondas HOBO modelo TMC6-HE	Sondas para determinación de temperatura superficial	Rango de -40 a 100°C, exactitud $\pm 0,25^\circ\text{C}$ a 20°C, resolución 0,03°C a 20°C.
Termocuplas tipo K	Sensores de temperatura	Temperatura en rango continuo hasta 1100°C
Hukseflux HF 01	Sensor de flujo de calor	Sensibilidad nominal 60×10^{-6} V/(W/m ²), exactitud $\pm 3\%$, rango de -2000 a 2000 W/m ²
NOVUS LOGBOX AA	Adquisidor de datos para registro de flujo de calor	Resolución 14 bits, exactitud $\pm 0,25\%$ para la medición de tensión. Memoria de 30000 registros por canal
Cámara Infrarroja Testo 871	Medición de temperatura	Resolución IR 240 x 180 pixeles, sensibilidad térmica $< 0,08^\circ\text{C}$, exactitud $\pm 2\%$
Caudalímetro YF-B1	Sensor de caudal volumétrico (efecto Hall)	Rango de caudal: 1-25L/min, cuerpo metálico, exactitud $\pm 2\% - 5\%$, salida 5V TTL
Bomba Rule (sumergible)	Bomba para circulación del agua	12 V, 1100 GPH (nominal)

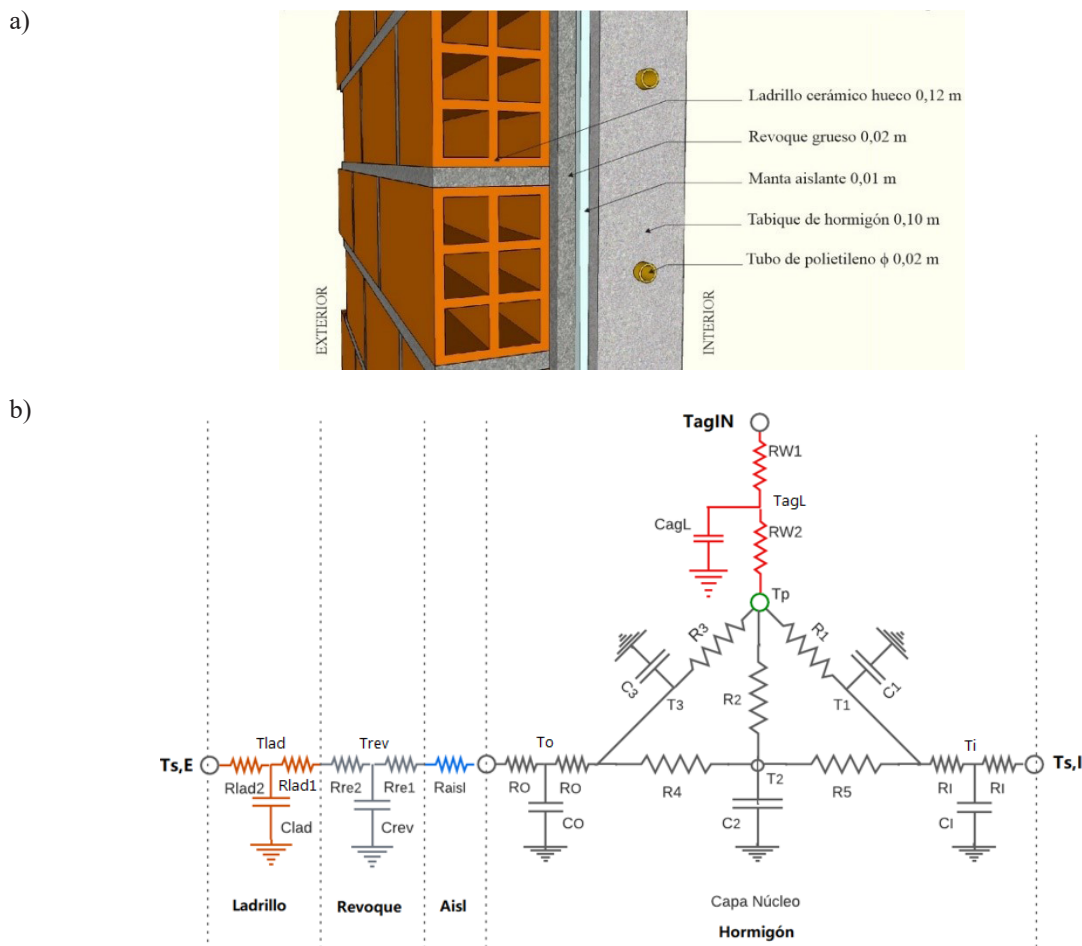


Fig. 4: a) Componentes de la pared experimental y b) esquema de la red RC resultante para el prototipo APES.

Tabla 2: Parámetros RC calibrados para la capa principal del sistema APES.

$R(m^2K/W)$							$C(J/m^2K)$				
R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_o	R_i	C_1	C_2	C_3	C_o	C_i
0.4439	0.0458	0.4439	0.0240	0.0240	0.0153	0.0153	17052	53742	17052	57081	57081

resistencia térmica R_{aisl} . Estos parámetros se definen como:

$$9) \quad R_{aisl} = \frac{e_{aisl}}{k_{aisl}}$$

$$10) \quad R_{rev1} = R_{rev2} = \frac{0.5 e_{rev}}{k_{rev}} \quad , \quad C_{rev} = e_{rev} \rho_{rev} c_{p,rev}$$

$$11) \quad R_{lad1} = R_{lad2} = \frac{0.5 e_{lad}}{k_{lad}} \quad , \quad C_{lad} = e_{lad} \rho_{lad} c_{p,lad}$$

donde e_{aisl} , e_{rev} y e_{lad} son los espesores (m) de la aislación, el revoque y el ladrillo, respectivamente. Las conductividades térmicas, en el orden mencionado, se presentan con k_{aisl} , k_{rev} y k_{lad} (W/m-K). Para el revoque y el ladrillo (capas que acumulan calor) se representa la densidad (kg/m^3) y el calor específico (J/kg-K) con $\rho_{rev} c_{p,rev}$ y $\rho_{lad} c_{p,lad}$, respectivamente.

Con los parámetros de la red RC conocidos, se genera el sistema de ecuaciones para resolver el problema de transferencia de calor. Para ello, se procede a plantear el balance de calor en cada nodo de la red RC de la figura 4b. El sistema de ecuaciones resultante se presenta en el Anexo 1, al final del trabajo. Si bien el sistema

de ecuaciones (1.A) – (9.A) puede resolverse mediante distintos métodos, en este caso, las ecuaciones se desarrollan y resuelven en el dominio de la frecuencia. Para ello, las condiciones de borde son convertidas a este dominio mediante la transformada discreta de Fourier y, luego de aplicar el método, las salidas del modelo se re-convierten al dominio del tiempo mediante la inversa de la transformada mencionada.

3. RESULTADOS

3.1. Termografía infrarroja IR

En la figura 5 se muestran imágenes tomadas con la cámara térmica para el día 25-08-22 a las 11:00 AM. En ese momento, la temperatura de entrada del agua fue de 44,1°C, mientras que la temperatura ambiente externa fue de 23,7°C. Las figuras 5a (VIS) y 5b (IR) corresponden a una imagen frontal de la pared prototipo, en esta última se aprecia la distribución de temperaturas correspondiente a la configuración del tubo (serpentina horizontal).

El perfil de temperaturas vertical, figura 5c, confirma los sectores por donde pasa el circuito de agua (zonas calientes). Analizando las temperaturas del perfil, se detecta que la masa superior se encuentra a mayor temperatura, donde el tubo inicia su recorrido, y que las diferencias de temperatura entre los sectores “con” y “sin” tubo no

supera 1°C. Cabe resaltar que la imagen fue tomada luego de 24 horas de funcionamiento continuo del sistema. A partir de las figuras 5d y 5e, que muestran la imagen VIS e IR (respectivamente) de una toma hacia la arista entre la pared norte y la pared este, se observa el contraste entre una pared radiante y una que no posee dicho sistema (para condiciones de invierno). Del perfil de temperaturas horizontal, figura 5c, la diferencia de las temperaturas medias de ambas superficies es de 10°C aproximadamente.

De la información brindada por la termografía se pudo verificar que la superficie del prototipo no presenta gradientes apreciables de temperatura, ya que los modelos propuestos consideran nodos únicos para representar las temperaturas de los planos (con área A_{pared}).

3.2. Datos experimentales

Los datos de monitoreados entre el 22 y 26 de agosto de 2022, con una frecuencia de 10 min, se muestran en la figura 6. Se registraron temperaturas superficiales (externa e interna), ambien-

tes (externo e interno) y del agua (entrada y salida del circuito). Cabe mencionar que estos datos son variables en el tiempo, por lo que el modelo RC debe ser capaz de representar las características dinámicas del problema.

Como puede observarse de la figura 6, entre los días 22 y 25 de agosto el sistema funcionó como calentador (circulando agua caliente). También, mediante la figura, es evidente el momento de desconexión de la resistencia eléctrica (encargada del calentamiento del agua antes del ingreso en el APES), esto ocurre el 22/08 a las 17:30. En dicho instante, se produce una caída pronunciada de las temperaturas T_{supIN} , T_{supEX} , T_{agIN} , T_{agOUT} . Este periodo fue incluido para evaluar la respuesta del modelo RC frente a cambios bruscos en las condiciones de operación del sistema.

El aporte del sistema APES se ve reflejado en la uniformización de la temperatura ambiente interior (T_{airIN}), como se indica en la Tabla 3. Las temperaturas ambiente exterior y superficial externa presentan una amplitud considerable frente a sus pares interiores,

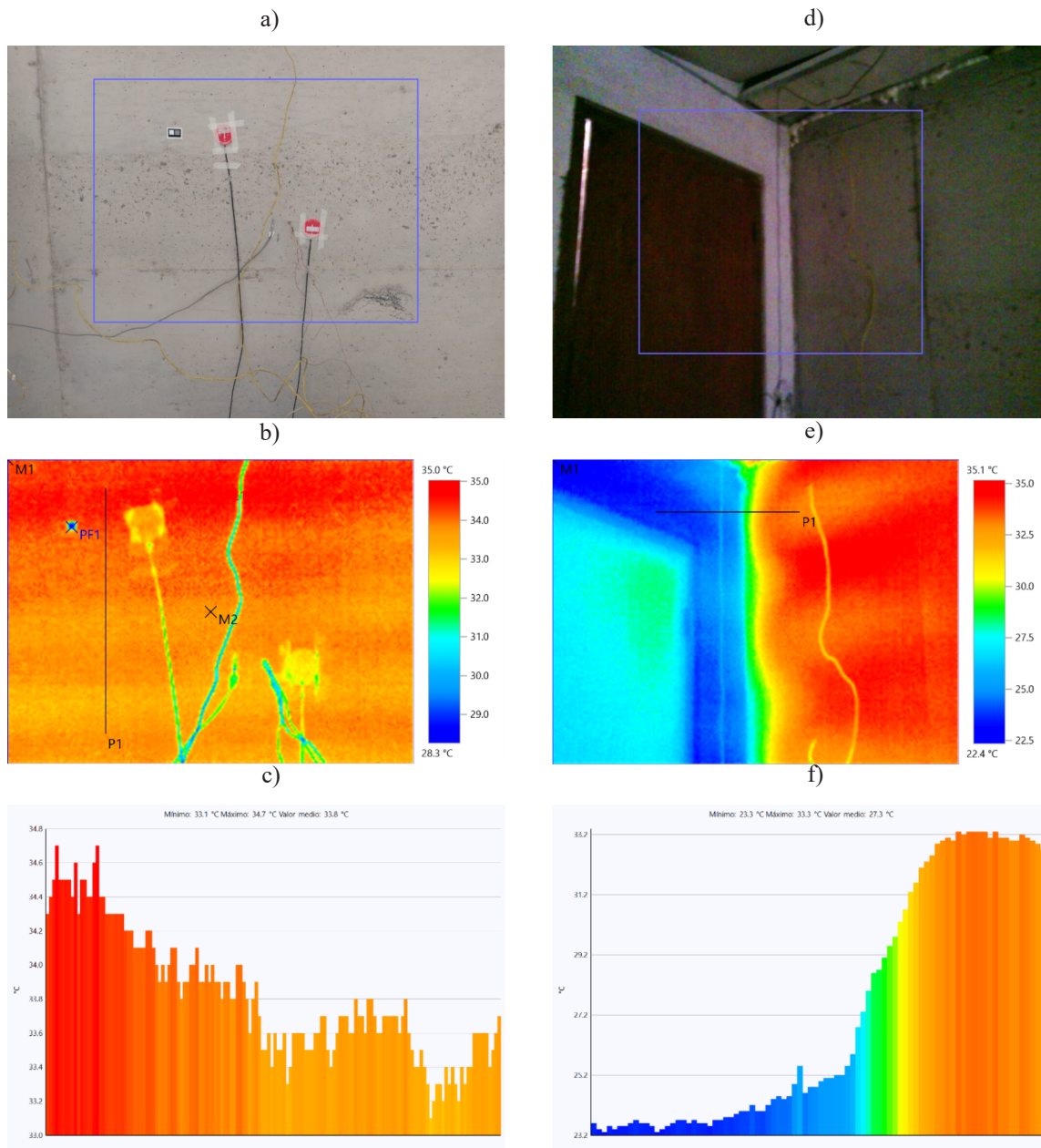


Fig. 5: Imágenes tomadas con la cámara térmica del interior de la casilla. Pared con APES: imagen VIS (a), imagen IR (b) y perfil de temperatura vertical marcado con el trazo "P1" (c). Vértice entre pared norte y pared este (sin APES): imagen VIS (d), imagen IR (e) y perfil de temperatura horizontal marcado con el trazo "P1" (f).

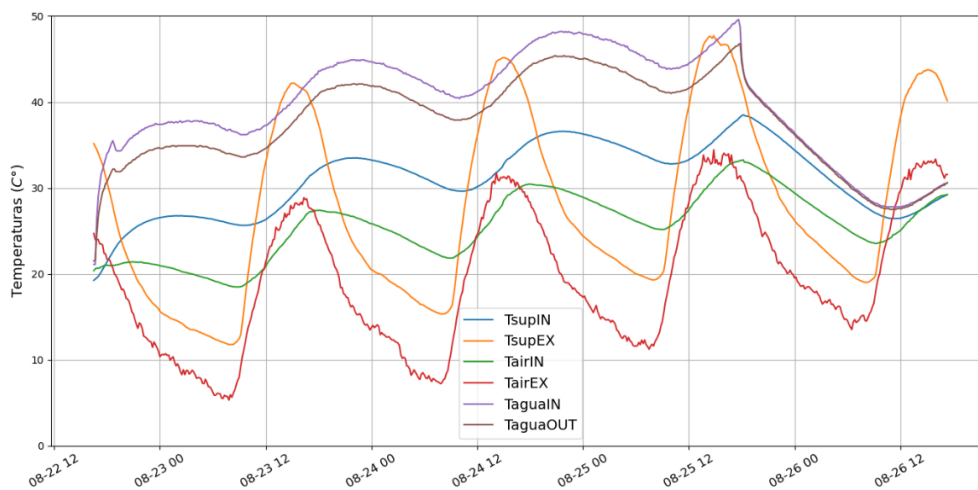


Fig. 6: Registro de temperaturas durante el ensayo de los días 22 al 26 de agosto de 2022.

Tabla 3: Estadística de los datos medidos de temperatura, para los días 22 al 26 de agosto.

	T_{supIN}	T_{supEX}	T_{airIN}	T_{airEX}	T_{agIN}	T_{agOUT}
Media (°C)	31,0	27,9	25,6	19,5	39,9	37,8
Mínima (°C)	19,2	11,8	18,5	5,3	21,1	21,5
Máxima (°C)	38,5	47,7	33,3	34,4	49,6	46,8
STD (°C)	4,1	10,3	3,8	8,0	6,1	5,4

lo que está reflejado en los valores de desviación estándar (STD).

3.3. Desempeño del modelo térmico

En cuanto al flujo de calor superficial del lado interior de la pared APES, se cuenta con datos medidos directamente a través del sensor Hukseflux HF01, mientras que los datos experimentales del flujo de calor intercambiado por el agua del circuito se determinan de manera indirecta (en función de las temperaturas T_{agIN} y T_{agOUT}), figura 7.

Las condiciones de borde impuestas al sistema corresponden a los perfiles de temperatura superficial interior, exterior y la del agua a la entrada del circuito (*loop*), con un caudal másico constante de 6,5 kg/min. Para determinar el grado de ajuste entre los datos simulados y medidos se determinaron los siguientes parámetros estadísticos (Taylor, 1997): raíz del error cuadrático medio (RMSE), raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE), coeficiente de correlación (Corr) y el desvío estándar relativo (STDr).

La tabla 4 muestra los parámetros estadísticos de ajuste para el flujo de calor sobre la superficie interna y para el circuito de agua. Se determinaron valores de RMSE de 5,1 W/m² (NRMSE de 9%)

y 17,3 W/m² (NRMSE de 17%), respectivamente. Esto es concordante con lo observado en la figura 7, donde la no superposición de las curvas en los perfiles de flujo de calor cedido por el circuito de agua (figura 7, derecha) puede deberse a la determinación indirecta de esta magnitud (tomado como “dato medido”). Se destaca el alto grado de correlación para ambas series simuladas con un valor de 0,98. Esto significa un buen seguimiento de los patrones de los perfiles medidos en ambos casos. Inclusive los cambios en los perfiles de flujo de calor registrados el 22/08 desde las 17:30 (apagado de la fuente de calor) son correctamente representados por el modelo.

También, se analizaron estadísticamente los datos de temperatura que el modelo entrega como salida: $T_{agOUT-sim}$ y T_{P-sim} . La medida de la temperatura superficial del tubo se realiza mediante una termocupla embebida en el tabique de hormigón, ubicada en la región central de la pared. El contraste entre los perfiles medidos y simulados se muestran en figura 8. Es importante remarcar el cambio en la tendencia de los perfiles de temperatura desde el momento en donde se apaga la fuente de calor, lo que provoca un acercamiento en todas las temperaturas indicadas en la figura. La Tabla 5 resume los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico del conjunto de datos, confirmando un alto grado de ajuste entre series de datos.

Tabla 4: Parámetros estadísticos de ajuste para los datos de flujo de calor.

Parámetros estadísticos	Superficie interna de la pared	Circuito de agua
RMSE (W/m ²)	5,1	17,3
NRMSE (%)	9	17
STDr	0,98	1,16
Corr	0,98	0,98
Flujo de calor medio (W/m ²)	-57,0 (-57,8)*	-74,4 (-88,1)*

*Sobre los datos medidos.

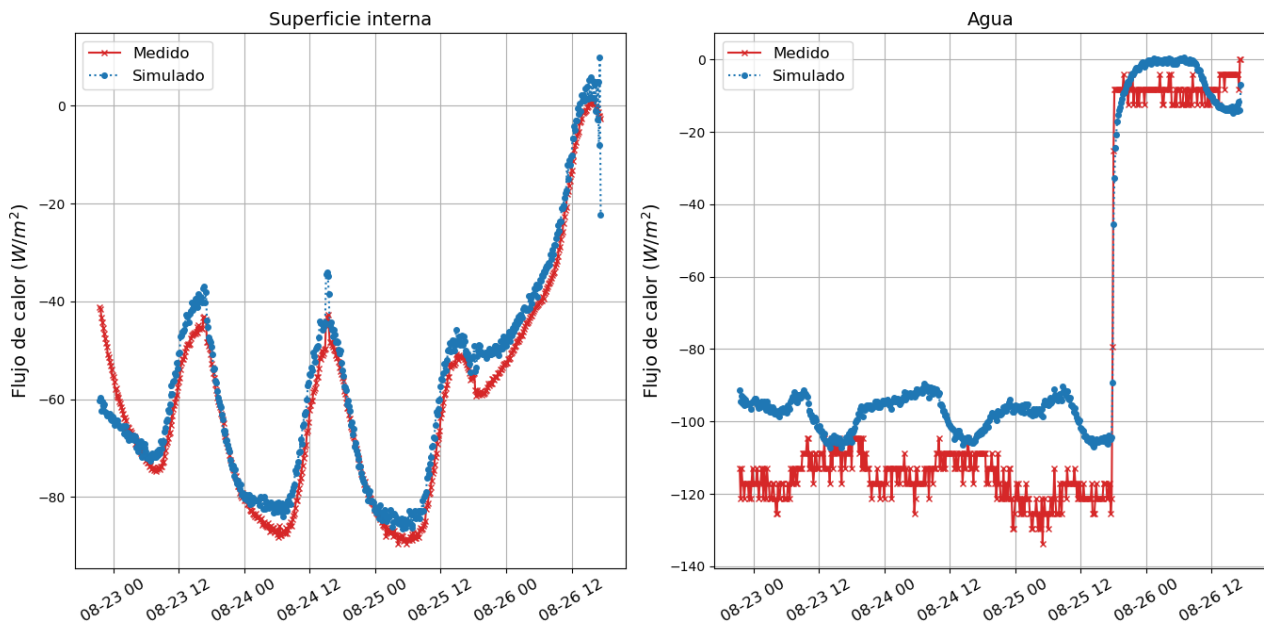


Fig. 7: Valores de flujo de calor en W/m^2 para la superficie interior de la pared (izq.) y para el agua del circuito interior del sistema (der.)

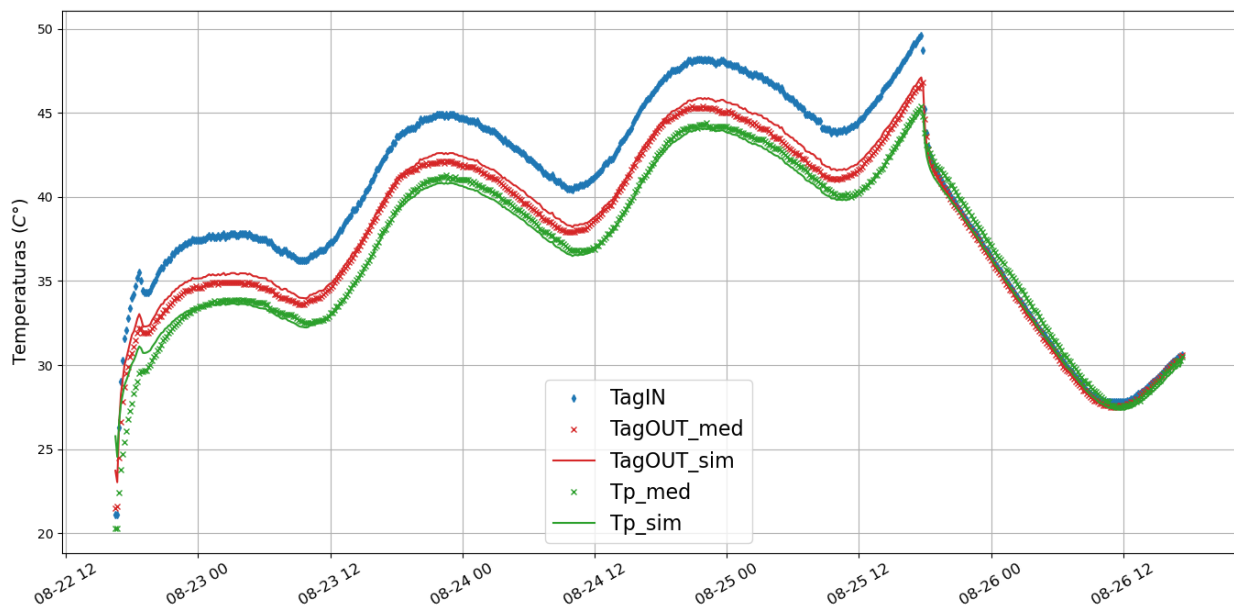


Fig. 8: Temperaturas medidas y simuladas para la salida del circuito de agua y para la superficie del tubo.

Tabla 5: Parámetros estadísticos de ajuste para los datos de temperaturas

Parámetros estadísticos	Salida del circuito de agua (T_{agOUT})	Superficie del tubo (T_p)
RMSE (°C)	0,5	0,7
NRMSE (%)	1	2
STDr	0,99	1,00
Corr	0,99	0,99

4. CONCLUSIONES

El modelo semi-dinámico propuesto es un modelo basado en la analogía eléctrica de resistencias y capacitores RC. El modelo tiene la capacidad de describir el comportamiento térmico de un sistema tipo APES con una precisión similar a la del modelo nu-

mérico FDFD (utilizado como referencia para la calibración de los parámetros de la red RC), pero a un costo computacional muy inferior y mayor simpleza. La integración con el método ϵ -NTU permitió considerar de manera simplificada, la 3ra dimensión del problema de transferencia de calor para estos sistemas (dirección axial del tubo dentro del tabique). Este acoplamiento se realizó a

través de un modelo 2R1C integrado a la red térmica del modelo RC dinámico. De igual manera, las capas complementarias de material que puedan formar un sistema APES, pueden ser incluidas mediante modelos sencillos 2R1C o 3R2C (dependiendo las características térmicas y la masividad de las capas).

Con respecto al marco experimental, se construyó y monitoreó un prototipo APES instalado sobre una de las paredes (orientación norte) de una casilla experimental existente en el campus del INENCO. Los registros de temperatura superficial exterior, interior (sobre la pared) y la del agua a la entrada del sistema se utilizaron como condiciones de borde (dinámicas) para alimentar el modelo. Mientras que los registros de temperatura del agua a la salida del sistema y de la superficie del tubo (embebido en el tabique de hormigón), incluidos los flujos de calor para la superficie interna de la pared y para el circuito de agua (determinado indirectamente) se usaron para contrastar las salidas del modelo y evaluar su desempeño bajo condiciones reales de operación.

En función de los 580 datos medidos (registros cada 10 min), se determinaron algunos parámetros estadísticos para cuantificar el grado de ajuste de las salidas del modelo RC semi-dinámico. En cuanto a los flujos de calor, se calcularon valores de NRMSE de 9% y 17% para la superficie interior de la pared y para el circuito del agua, respectivamente. Por las características del sensor de flujo implementado (para la medición sobre la pared), principalmente su sensibilidad, y por la clase de magnitud sensada, es que resulta difícil disminuir estos errores debajo del orden de 10%. Por otro lado, la medición del flujo de calor intercambiado por el agua (en su recorrido en el interior del APES) no se obtiene de manera directa, lo que puede incrementar la discrepancia entre datos simulados y medidos. El ajuste de las temperaturas, por su lado, se estableció con valores bajos de NRMSE, 1% y 2% para la salida del agua y superficie del tubo, respectivamente. Del análisis de los parámetros estadísticos, para ambas magnitudes, se considera que el ajuste entre tandas de datos medidos y simulados es satisfactorio, por lo que el modelo representa las características térmicas de este sistema complejo de manera acertada.

Como trabajo futuro, se pretende avanzar en la integración de este modelo RC simple con softwares de simulación de edificios, con el objetivo de generar simulaciones energéticas globales para edificios completos (multi-zona) bajo diferentes escenarios. Esto permitirá optimizar las estrategias de control asociadas al funcionamiento de los sistemas APES.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó en el marco del proyecto ANPCYT PICT 2018-04124: “Modelación y experimentación de sistemas de refrescamiento por acumulación estructural orientados a mejorar la eficiencia energética en edificios”.

REFERENCIAS

- Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., DeWitt, D.P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Seventh Edition. Wiley. ISBN 9780470501979.
- Hassan, M. A., & Abdelaziz, O. (2020). Best practices and recent advances in hydronic radiant cooling systems – Part II: Simulation, control, and integration. *Energy and Buildings*, 224, 110263. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110263>
- Hongn, M., Bre F., Montenegro, F. (2021). Simulación dinámica de un sistema de tubos embebidos con activación térmica: un nuevo modelo RC. *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 25, 109-120.
- Hongn, M., Bre, F., Valdez, M., & Flores Larsen, S. (2022). Two novel resistance-capacitance network models to predict the dynamic thermal behavior of active pipe-embedded structures in buildings. *Journal of Building Engineering*, 47, 103821. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103821>
- International Energy Agency IEA (2021), Building Envelopes, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/building-envelopes>
- Joe, J., y Karava, P. (2019). A model predictive control strategy to optimize the performance of radiant floor heating and cooling systems in office buildings. *Applied Energy*, 245(October 2018), 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.209>
- Leo Samuel, D. G., Nagendra, S. M. S., & Maiya, M. P. (2018). Parametric analysis on the thermal comfort of a cooling tower based thermally activated building system in tropical climate – An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 138(September 2017), 325–335. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.077>
- Li, A., Sun, Y., & Xu, X. (2017). Development of a simplified resistance and capacitance (RC)-network model for pipe-embedded concrete radiant floors. *Energy and Buildings*, 150, 353–375. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.011>
- Sourbron, M., De Herdt, R., Van Reet, T., Van Passel, W., Baelmans, M., & Helsen, L. (2009). Efficiently produced heat and cold is squandered by inappropriate control strategies: A case study. *Energy and Buildings*, 41(10), 1091–1098. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.015>
- Taylor J. (1997). *An Introduction to Error Analysis*. Second Edition. University Science Books. California.