

MODELO DE ANÁLISIS INTEGRAL DE FACTIBILIDAD DE UTILIZACIÓN DE THERMO ACTIVE BUILDING SYSTEMS EN EDIFICIOS DE OFICINAS

A COMPREHENSIVE MODEL FOR THE ANALYSIS OF FEASIBILITY OF THE USE OF THERMOACTIVE BUILDING SYSTEMS IN OFFICE BUILDINGS IN CHILE

ANEXO. MATERIAL SUPLEMENTARIO

A.1.- MATERIALIDAD Y CONDICIONES DE USO DEL EDIFICIO

La envolvente tiene la composición que se indica en las siguientes tablas (A1-1a, A1-1b, A1-1c y A1-1d):

Tabla A1-1a: Composición de cerramientos opacos. Muros.

Material	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (J/kgK)
Panel Tresa	0,01	0,17	600	1600
Poliuretano proyectado	0,05	0,028		
Hormigón armado	0,2	2,5	2500	1000
Cartón yeso	0,015	0,25	825	1000

Tabla A1-1b: Composición de cerramientos opacos. Forjado.

Material	e (m)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (J/kgK)
Solado piedra artificial	0,015	0,13	1500	1600
Mortero	0,05	1,35	1800	1000
Lámina de polietileno	0,005	0,33	920	2200
Hormigón armado	0,2	2,5	2500	1000

Tabla A1-1c: Composición de cerramientos acristalados [1]

	Superficie (m ²)	Vidrio exterior	Cámara (mm)	Vidrio interior	U (W/m ² K)	SHGC (-)
Norte	45,36	6 CLR	12	6 CLR	3,31	0,67
Sur	13,77	6 CLR	12	6 BE	2,62	0,59
Este/Oeste	35,10	6 BE	12	6 CLR	2,62	0,55

CLR (vidrio claro)

BE (vidrio bajo emisivo $\epsilon = 0,1$)

SHGF (solar heat gain coefficient) equivale a g (factor solar)

En todos los casos carpintería practicable de aluminio con rotura de puente térmico

Tabla A1-1d: Coeficiente de atenuación de sombras [1]

IAC₀	0,25
IAC₆₀	0,06
IAC_{difusa}	0,37

Para reducir las ganancias solares se han utilizado dispositivos de sombra, caracterizados por su coeficiente de atenuación de sombras, que representa la fracción del flujo de calor que finalmente ingresa al recinto. Este coeficiente se determina a partir de sus valores IAC₀, IAC₆₀ y IAC_{difusa}, cuyos valores están tabulados, y la posición del sol en cada momento del año.

Se ha considerado un edificio de oficinas con un horario de funcionamiento de lunes a viernes, continuo desde las 8 AM a las 6 PM. Durante este periodo de tiempo, la temperatura ambiente debe mantenerse en el intervalo recomendado por el modelo de confort de Fanger [2] para un 10% de insatisfechos -categoría de proyecto B- (Tabla A1-2).

Tabla A1-2: Intervalo de confort según época del año para PPI<10%.

Tipo de ropa	Estación	Intervalo de temperaturas
Chaqueta	Invierno	20,0 ... 24,0
Camisa manga larga	Transición	21,5 ... 25,5
Camisa manga corta	Verano	23,5 ... 27,0

También se han impuesto límites a los coeficientes de transmisión y a las temperaturas superficiales de suelo y techo para evitar disconfort local y eventuales condensaciones [3, 4] (Tabla A1-3).

Tabla A1-3: Límites impuestos a las superficies de suelo y techo según tipo de acondicionamiento

	Coeficiente de transferencia máximos		Temperatura superficial	
	Calefacción	Refrigeración	Máximo	Mínimo
Suelo	11 (W/m ² K)	7 (W/m ² K)	29 (°C)	
Techo	6 (W/m ² K)	11 (W/m ² K)		17 (°C)

El resto de condiciones de uso del edificio se muestran en la siguiente tabla (Tabla A1-4), cuyos datos se han obtenido de las recomendaciones citadas por ASHRAE [1]:

Tabla A1-4: Condiciones de uso del edificio.

Superficie útil oficinas	360 m ²
Tasa de ocupación	6 m ² /p
Número de ocupantes por planta	60 p
Ganancias por ocupantes	130 W/p
Ganancias por iluminación	8,1 W/m ²
Ganancias por equipos	8,61 W/m ²
Tasa de infiltración	0,2 ACH 75 l/s·planta
Tasa de ventilación	12,5 l/s·p

REFERENCIAS ANEXO 1

- [1] ASHRAE Fundamentals, American Society of Heating, Ventilation and Air Conditioning Engineers, 2013.
- [2] UNE-EN ISO 7730. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local. AENOR, 2006.
- [3] B.W. Olesen, Possibilities and limitations of radiant floor cooling. ASHRAE Transactions 103 (1977) 42 – 48.
- [4] B.W. Olesen, E. Michel, F. Bonnefoi, M. De Carli. Heat exchange coefficient between floor surface and space by floor cooling: theory or a question of definition. ASHRAE Transactions 106 (2000) 684 – 694.

A.2.- MODELO DE TRANSMISIÓN DEL CALOR

Con el modelo empleado [1], a partir de la analogía eléctrica es posible plantear el problema como una red en estrella de resistencias desde la temperatura del agua T_{ws} hasta la temperatura de las estancias superior T_1 e inferior T_2 , tal como se muestra en la siguiente figura A2-1.

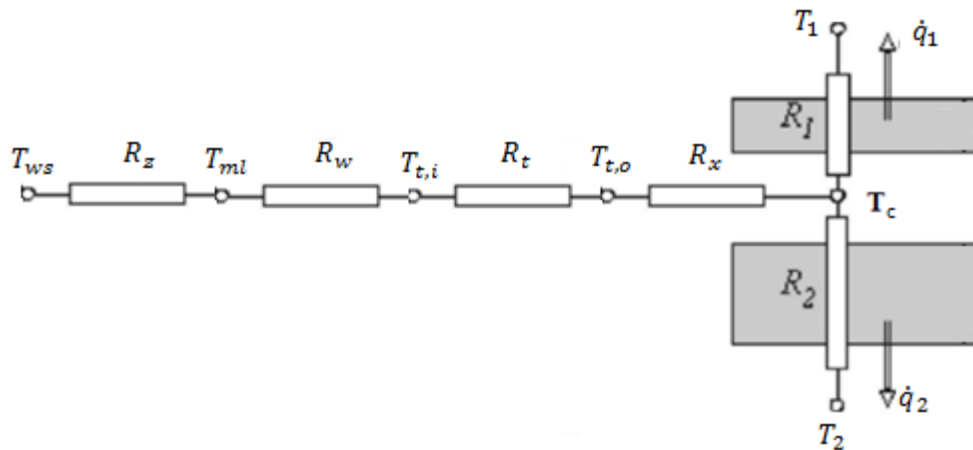


Fig. A2-1: EMPA/UNE: Modelo de Resistencia para una losa de hormigón activo

En ella, las resistencias térmicas R_1 y R_2 se refieren a la transferencia de calor desde la temperatura del núcleo hacia la estancia superior e inferior y se calculan como:

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_i} = \frac{1}{U_i}$$

La resistencia térmica R_x es responsable de la diferencia de temperatura entre la superficie exterior del tubo y la temperatura del núcleo de hormigón, siendo independiente del espesor de esta capa, como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$R_x = \frac{d_x \ln\left(\frac{d_x}{\pi d_{t,0}}\right)}{2\pi\lambda_t}$$

A ellas se agregan las resistencias térmicas causantes de la transferencia de calor por conducción a través de la pared del tubo R_t

$$R_t = \frac{\ln\left(\frac{d_{t,0}}{d_{t,i}}\right) d_x}{2\pi\lambda_t}$$

Y por convección forzada en su interior, R_w

$$R_w = \frac{1}{h_w}$$

Con h_w , coeficiente de transmisión superficial del calor en la capa de agua en contacto con la pared interior, que se relaciona con los números de Prandtl, Pr , y Reynolds, Re , del flujo mediante la expresión:

$$0,023Pr^{0,3}Re^{0,8} = \frac{h_w d_{t,i}}{\lambda_t}$$

Este modelo precisa de una última resistencia, R_z , que relaciona la temperatura media del agua en el serpentín con la temperatura de suministro, T_{ws} , que es la que se usa en el controlador, y es función de la longitud del tubo, L_t , y el caudal de agua. Se obtiene con la expresión:

$$R_z = \frac{d_x L_t}{\dot{m}_w c_w \left(1 - \exp\left(-\frac{d_x L_t}{R_k \dot{m}_w c_w}\right)\right)} - R_k$$

Donde R_k es la suma de las resistencias ya definidas previamente:

$$R_k = R_w + R_t + R_x + \frac{1}{U_1 + U_2}$$

Por su parte, el estudio de estado transitorio proporciona una caracterización del efecto de acumulación de energía en el hormigón. Además, permite analizar el efecto auto-regulador de los TABS, el efecto del encendido y apagado de la bomba, y el potencial de almacenamiento térmico. Por ello, el modelo resistivo estacionario debe complementarse con un estudio que refleje la variación de los estados en función del tiempo. Es posible abordar de forma simplificada este problema mediante una ecuación diferencial con un valor inicial de temperatura T_0 para conocer la temperatura de un elemento en un instante dado T_{i+1}

La ecuación de balance utilizada es:

$$\dot{q}_w - \dot{q}_1 - \dot{q}_2 = m_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial t}$$

Tal como puede observarse en la figura A2-2, el flujo de calor aportado por el agua \dot{q}_w se disipa a través de las superficies en contacto con los ambientes 1 y 2 y se acumula en el hormigón, variando su energía interna U y en última instancia su temperatura T_c , que es la incógnita de la ecuación, resuelta por el método numérico de Euler.

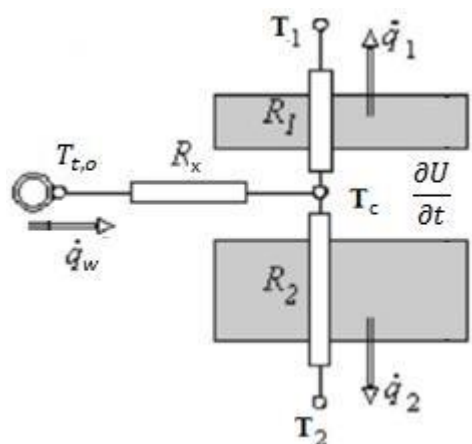


Fig. A2-2: Balance de energía y acumulación en el hormigón

Por último, para introducir en el esquema, el comportamiento activo o pasivo del TABS, sólo es necesario asumir que cuando la bomba no está funcionando, no existirá aporte o extracción de calor por parte del agua, o sea $\dot{q}_w = 0$, y el hormigón acondicionará los ambientes de forma pasiva debido a su energía interna. Mientras que cuando la bomba funciona se activa la losa de hormigón, el calor que intercambia el agua se puede calcular como:

$$\dot{q}_w = \frac{T_{ws} - T_c}{R_c}$$

Con R_c , resistencia equivalente desde la temperatura de suministro del agua hasta la temperatura del núcleo de hormigón. Es decir:

$$R_c = R_z + R_w + R_t + R_x$$

REFERENCIAS ANEXO 2

- [1] UNE-EN 15377. Sistemas de calefacción en edificios. Parte 1: Determinación de la capacidad nominal de diseño de calefacción y refrigeración. Parte 2: Diseño, dimensionado e instalación. AENOR, 2009.

A.3.- NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades
c_c	Calor específico del hormigón	J/kg°C
c_w	Calor específico del agua	J/kg°C
d	Espesor de una capa sólida de un elemento constructivo	m
$d_{t,i}$	Diámetro interior de la tubería	m
$d_{t,o}$	Diámetro exterior de la tubería	m
h	Coefficiente de transmisión superficial del calor de una pared en contacto con el aire	W/m²K
h_w	Coefficiente de transmisión superficial del calor de una pared en contacto con el agua en movimiento	W/m²K
L_t	Longitud de tubería	m
m_c	Masa de hormigón	kg
\dot{m}_w	Flujo másico de agua	kg/s

Pr	Número de Prandtl	-
\dot{q}_w	Flujo de calor por unidad de superficie aportado por el agua	W/m ²
\dot{q}_1	Flujo de calor por unidad de superficie aportado por el elemento activado al local superior	W/m ²
\dot{q}_2	Flujo de calor por unidad de superficie aportado por el elemento activado al local inferior	W/m ²
R_1	Resistencia térmica de la losa, desde su núcleo activado hasta el aire del local superior	m ² K/W
R_2	Resistencia térmica de la losa, desde su núcleo activado hasta el aire del local inferior	m ² K/W
Re	Número de Reynolds	-
R_t	Resistencia térmica de la tubería	m
R_w	Resistencia térmica superficial de la pared interior de la tubería	m ² K/W
R_x	Resistencia térmica de la capa ficticia entre la pared exterior de la tubería y el núcleo activado	m ² K/W
R_z	Resistencia térmica que relaciona la temperatura media del agua en el serpentín con la temperatura de suministro	m ² K/W
T_1	Temperatura del aire en el local superior	°C
T_2	Temperatura del aire en el local inferior	°C
T_c	Temperatura del núcleo de la losa de hormigón	°C
$T_{t,i}$	Temperatura de la pared exterior de la tubería	°C
$T_{t,o}$	Temperatura de la pared exterior de la tubería	°C
T_{ws}	Temperatura de entrada del agua	°C
U	Transmitancia térmica de un elemento constructivo	W/m ² K
λ	Conductividad térmica del material constitutivo de una capa de un elemento constructivo	W/mK

A.4.- CARACTERÍSTICAS DEL CONTROLADOR

El control del sistema radiante se lleva a cabo a partir del manejo coordinado de dos mecanismos: un control central que define una curva de la temperatura del agua en función de la temperatura exterior, y una variable de zona como realimentación (feedback) al sistema. Esta realimentación on/off cuenta con una banda muerta de temperaturas que evita las oscilaciones entre el funcionamiento de calefacción y enfriamiento.

La estrategia de control on/off con realimentación está basada en una temperatura continuamente medible, $T_{controlled}$, que no depende del funcionamiento de la bomba. El punto de ajuste, T_{set} , es el valor esperado de la variable controlada, y la banda $\Delta T_h + \Delta T_c$ alrededor de este parámetro define los límites para calefacción $T_{set,h}$ y refrigeración, $T_{set,c}$. Un sensor mide la $T_{controlled}$ y transmite este valor al controlador quien lo compara con T_{set} y genera una acción correctiva hacia los dispositivos controlados que son el suelo y el techo del espacio (figura A4-1).

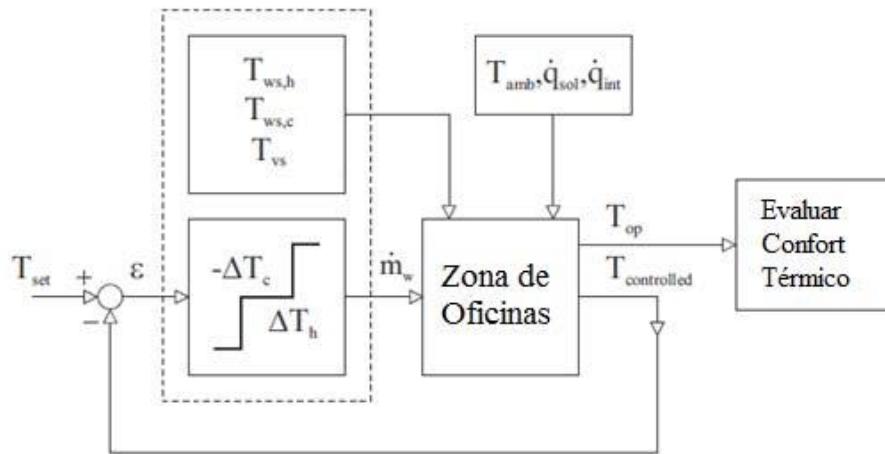


Fig. A4-1: Concepción del sistema de control

En este caso es usado un controlador on/off de 3 etapas (figura A4-2) que ejecuta las siguientes acciones:

- Enciende la calefacción si $T_{controlled} < T_{set} - \Delta T_h$
- No ejecuta acción si $T_{set} - \Delta T_h < T_{controlled} < T_{set} + \Delta T_c$
- Enciende la refrigeración si $T_{controlled} > T_{set} + \Delta T_c$

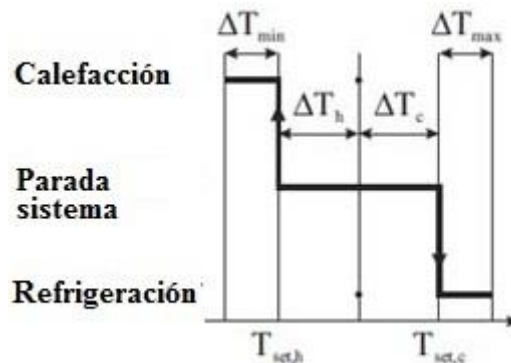


Fig. A4-2: Etapas de un controlador convencional

Para mayor comodidad, ΔT_{min} y ΔT_{max} se utilizan como parámetros de control, y se relacionan de la siguiente forma:

$$T_{set,h} = T_{set} - \Delta T_h = T_{min} + \Delta T_{min}$$

$$T_{set,c} = T_{set} + \Delta T_c = T_{max} - \Delta T_{max}$$

El agente de control es el agua para calefacción o enfriamiento suministrada al TABS, cuya temperatura de suministro depende de las curvas de calefacción y enfriamiento, tomadas de un modelo elaborado por Sourbron [1] para un edificio de oficinas de dos zonas en un clima moderado. Estas curvas pueden ser adaptadas mediante los factores de corrección CF_{hsv} y CF_{csv} (figura A4-3), dando lugar a un nuevo valor de ajuste para la temperaturas de suministro de agua, $T_{ws,hsv}$ y $T_{ws,csv}$.

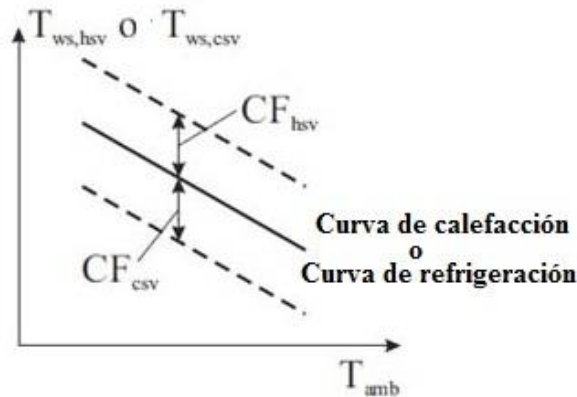


Fig. A4-3: Influencia de los factores de corrección de las curvas de calefacción y/o refrigeración

Tal como se ha mencionado anteriormente, el modelo convencional otorga resultados globales como respuesta a distintos ajustes de los parámetros del controlador. Esto implica que la configuración debe personalizarse para cada zona climática estudiada, ya que en cada una de ellas usa la combinación de ajustes que otorga los mejores resultados en términos de confort térmico.

Los ajustes del controlador particularizados para cada zona pueden consultarse en la tabla A4-1.

Tabla A4-1: Ajustes del controlador según zona y temporada

Zona	CF_{hsv}/CF_{csv}	$\Delta T_{min}/\Delta T_{max}$				
		Ene-Feb	Mar-Abr	May-Ago	Sep-Oct	Nov-Dic
A	+6/-6	0/1	0/1	0/0,5	0/1	0/1
B	+6/-6	0/1	0/1	0/0,5	0/1	0/1
C	+3/-3	0,5/1	0/1	0/1	0/1	0,5/1
D	+3/-3	0/2	0/1	0/0	0/1	0/2
E	+3/-3	0,5/1	0/1	0/1	0/1	0,5/1
F	+6/-6	0/0	0/1	0/0,5	0/1	0/1
G	+3/-3	0/2	0/1	0/0	0/1	0/2
H	+3/-3	0/1	0/1	0,5/0	0/1	0/1

Por su parte, la tabla A4-2 muestra los ajustes comunes a todas las zonas climáticas:

Tabla A4-2: Ajustes del controlador comunes a todas las zonas climáticas

Curva de calefacción	$T_{ws,hsv} = -0,22T_{oa} + 25,1 + CF_{hsv}$	
Curva de refrigeración	$T_{ws,csv} = -0,16T_{oa} + 23,3 + CF_{csv}$	
$T_{controlled}$	Temperatura interior del aire (T_{ia})	
T_{set}	$T_{ia} = 23$	
T_{max}/T_{min}	Lunes a viernes	26/21
	Sábado y domingo	27/20

REFERENCIAS ANEXO 4

[1] M. Sourbron, Dynamic thermal behaviour of buildings with concrete core activation. pp. 157-160. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería, KU Leuven, 2012.