

MODELAMIENTO SIMPLIFICADO DE UN EDIFICIO DE UNA ZONA MEDIANTE UNA RED R-C PARA APLICACIONES HVAC.

One-zone modeling of a building using of an R-C network to HVAC applications.

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados del estudio realizado para desarrollar un modelo térmico computacional de un edificio. El modelo considera el intercambio de calor y humedad entre un espacio climatizado (mono-zona) y una red capacitiva R-C de las paredes y ventanas. Este modelo puede ser usado en el marco de una pre-auditoria energética del edificio, considerando que no se dispone usualmente de una identificación experimental del consumo de calefacción o enfriamiento (por lo general no se instalan contadores independientes de estos sistemas). Sin embargo el cálculo de la demanda energética es requerida en la búsqueda de oportunidades de reducción del consumo de energía global del edificio.

PALABRAS CLAVES: Edificio, HVAC, Modelamiento

ABSTRACT

This article presents the results of a study performed to develop a computational model of a mono-zone building. The model considers the latent and sensible heat exchange between an air space (mono-zone) connected to a detailed lumped dynamic model of the building walls and windows (R-C network). This model can be used in the frame of a pre-audit procedure, where an experimental identification of the building heating & cooling demands is usually not envisaged (heat/cool counters are not often installed in buildings). But a calculation of theoretical demands and corresponding energy consumptions is required at the start of a feasibility calculation and of a detailed study of retrofit opportunities.

KEYWORDS: Building, HVAC, Modeling.

1. INTRODUCCIÓN

El modelamiento térmico puede ser usado en el marco de una pre-auditoria energética del edificio, considerando que no se dispone usualmente de una identificación experimental del consumo individual de calefacción o enfriamiento (por lo general no se instalan contadores independientes de estos sistemas). Sin embargo se requiere el cálculo de la demanda energética en la búsqueda de oportunidades de reducción del consumo de energía global del edificio.

En vista del número de parámetros y factores que están implicados en este tipo de cálculo, parece racional utilizar un modelo térmico de simulación del edificio en lugar de un modelo hipotético global de los índices del clima (similares a los grados-días en el cálculo del consumo de calefacción). Para esta tarea se requiere de modelos de simulación suficientemente fáciles de utilizar, transparentes, confiables, exactos y robustos.

El nivel de detalle requerido para cada cálculo puede ser muy diferente. Para los cálculos de la calefacción, los

NÉSTOR FONSECA DIAZ

Ph.D. University of Liège Belgium
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
nfonseca@utp.edu.co

JORRE OPDENACKER

Energetic development Consulting
Amsterdam, Holland

temas importantes son una descripción correcta del sobre del edificio y una evaluación exacta de la renovación del aire. Para los cálculos de enfriamiento, el área y la orientación de la ventanearía, la intensidad y la distribución de la carga térmica interna, los flujos de ventilación, y la localización geográfica aparecen como asuntos críticos.

El modelo simplificado del edificio se ha ejecutado en el software EES (Engineering Equation Solver) [1] como herramienta de evaluación "comparativa" y de auditoria [2], [3], [4], [5], [6], [7]. También en combinación de un modelo detallado de techos radiantes [8].

2. MODELO DE ZONA

El modelo del edificio de la mono-zona incluye consideraciones realistas y físicas:

- comportamiento (estático y dinámico) constructivo.

- cargas del clima y de la ocupación, - exposición y orientaciones solares

- características de los materiales que componen la estructura del edificio.

El modelo del edificio se basa en una red equivalente simplificada de R-C (con cinco masas térmicas, Figura 1), correspondientes a una zona abierta rodeada por las paredes internas ligeras de partición y las paredes externas vidriadas y/o opacas. Este esquema corresponde a un edificio de oficinas típico, integrado principalmente por una estructura en concreto. Un balance de calor sensible se establece en el nodo de interior, que está conectado con la estructura (techo, piso y paredes de partición), con el aire ambiente (paredes y las ventanas exteriores) y con el sistema de ventilación (conductos de suministro). Se considera también la influencia de infiltraciones y/o de exfiltraciones. Las unidades terminales y las demás cargas “inyectadas” (ventanas, ocupantes, iluminación, equipos y la radiación solar) se consideran para definir “las ganancias de calor sensible (convectivo y radiativo)”. Las ganancias solares y las pérdidas en infrarrojo a través de las paredes opacas son consideradas inyectándose en nodos en contacto con el ambiente exterior de las paredes. El efecto del almacenamiento de energía dentro de la zona (aire y los muebles) es representado por una segunda capacitancia térmica (C_{in}). Las derivaciones con el piso y la azotea se pueden conectar con las condiciones variables (como condiciones al aire ambiente) o utilizar para modelar las paredes internas que separan dos zonas similares.

El balance térmico sensible de la zona puede ser evaluado mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a = & \dot{Q}_{RC,conv,i,s} + \dot{Q}_{inac,RC,conv,i,s} + \dot{Q}_{i,w,left,conv,i,s} \\ & + \dot{Q}_{i,w,right,conv,i,s} + \dot{Q}_{i,w,bottom,conv,i,s} + \dot{Q}_{i,w,floor,conv,i,s} \\ & + \dot{Q}_{e,w,conv,i,s} + \dot{Q}_{win,conv,i,s} + \dot{Q}_{i,load,conv} + \dot{Q}_{ven} \quad [W] \quad (1) \end{aligned}$$

Donde

$$\Delta U_a = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{U}_a \cdot d\tau \quad [J] \quad (2)$$

$$\Delta U_a = C_a \cdot (t_{a,room} - t_{a,room,1}) \quad [J] \quad (3)$$

$$C_a = F_{f,i,c} \cdot c_{p,a} \cdot \rho_a \cdot V_{room} \quad [J K^{-1}] \quad (4)$$

El balance térmico considera el flujo de calor por convección en cada superficie en contacto con el volumen aire, incluyendo la posibilidad de una superficie inactiva del techo. La capacidad del aire se corrige por un factor hipotético ($F_{f,i,c}$), supuesto para considerar el efecto la capacidad de almacenamiento térmico de todas las superficies y equipos dentro de la zona (paredes y muebles). Lebrun [9], propone un factor de 5.

El valor $\dot{Q}_{i,load,conv}$ es la porción convectiva de la carga térmica interna y \dot{Q}_{ven} es la contribución sensible del sistema de ventilación mecánico. Los coeficientes de transferencia del calor de convección en el lado interno de las paredes del local (externo, izquierdo, derecho y fondo (cerca del pasillo)) se calculan usando las correlaciones de Churchill y de Chu [10], sobre la gama entera de número de Rayleigh (Ra):

$$Nu = \left[0.825 + 0.387 \cdot \frac{Ra^{1/6}}{\left(1 + \left[\frac{0.492}{Pr} \right]^{9/16} \right)^{8/27}} \right]^2 \quad [-] \quad (5)$$

Y para la superficie externa de la pared externa para números de Reynolds (Re) de $5 \cdot 10^5$ a 10^8 y del número de Prandtl (Pr) a partir la 0.6 a 60 mediante:

$$Nu = (0.037 \cdot Re^{4/5} - 871) \cdot Pr^{1/3} \quad [-] \quad (6)$$

Para la superficie del piso se utilizan las correlaciones de Mc Adams [10]:

- Para una superficie superior enfriada: Ra desde 10^5 hasta 10^{10}

$$Nu = 0.27 \cdot Ra_{RC,room}^{1/4} \quad [-] \quad (7)$$

- O para una superficie superior calentada: Ra desde 10^4 hasta 10^5

$$Nu = 0.54 \cdot Ra_{RC,room}^{1/4} \quad [-] \quad (8)$$

4. MODELO DE LAS PAREDES

El flujo del calor que pasa a través de la estructura exterior del edificio es la suma de dos contribuciones: El flujo de calor a través de las ventanas (sin almacenaje de energía) y paredes masivas opacas (con almacenamiento de energía). Un modelo de red de dos puertos R-C se utiliza para simular cada pared circundante (las losas del piso y del techo, pared externa, techo radiante inactivo y las paredes de partición). Los parámetros de esta red en la pared R-C se ajustan con un análisis de la característica de frecuencia. Este modelo de la zona del edificio se ha validado con éxito por medio de las pruebas analíticas, experimentales y comparativas de la validación [6]. En este estudio, se utilizan las condiciones límite isotérmicas [11] para las paredes externas e internas. El método de matriz de admitancias se utiliza para calcular la transmitancia térmica global de la pared cuyo módulo se impone al modelo 2RIC para ajustar sus parámetros. Los balances de los nodos considerados se presentan más adelante.

Los ganancias solares y las pérdidas infrarrojas se consideran y se inyectan o se sacan del nodo superficial de la pared externa expuesto al aire ambiente (Figura 1).

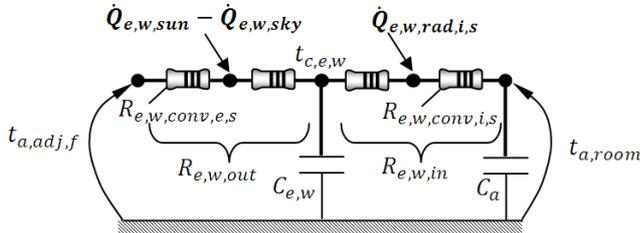


Figura 1. Modelo térmico simplificado de una zona del edificio: Circuito eléctrico equivalente

El balance térmico (convectivo) en la pared externa se puede expresar como:

$$\dot{U}_{e,w} = \dot{Q}_{out,e,w} - \dot{Q}_{in,e,w} \quad [W] \quad (9)$$

$$\Delta U_{e,w} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{U}_{e,w} d\tau \quad [J] \quad (10)$$

$$\Delta U_{e,w} = C_{e,w} (t_{c,e,w} - t_{c,e,w,1}) \quad [J] \quad (11)$$

$$C_{e,w} = \phi_{e,w} m_{e,w} c_{p,e,w} \quad [J K^{-1}] \quad (12)$$

El balance sobre el lado exterior de la pared exterior es:

$$\dot{Q}_{e,w,out} = \dot{Q}_{e,w,conv,e,s} + \dot{Q}_{e,w,sun} - \dot{Q}_{e,w,sky} \quad [W] \quad (13)$$

Donde:

$$\dot{Q}_{e,w,out} = \frac{t_{a,adj,f} - t_{e,w,e,s}}{R_{e,w,conv,e,s}} \quad [W] \quad (14)$$

$$R_{e,w,conv,e,s} = \frac{1}{A_{e,w} h_{e,w,e,s}} \quad [K W^{-1}] \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{e,w,out} = \frac{t_{e,w,e,s} - t_{c,e,w}}{R_{e,w,out} - R_{e,w,conv,e,s}} \quad [W] \quad (16)$$

$$R_{e,w,out} = (1 - \theta_{e,w}) R_{e,w,total} \quad [K W^{-1}] \quad (17)$$

$$R_{e,w,total} = \frac{1}{AU_{e,w}} \quad [K W^{-1}] \quad (18)$$

Los valores $\theta_{e,w}$ y $\phi_{e,w}$ son los parámetros de acequibilidad y proporción respectivamente (red R-C) de la pared considerada. Se obtienen usando el método propuesto por Masy, [11].

El balance del lado interno de la pared exterior puede ser escrito como:

$$\dot{Q}_{e,w,in} + \dot{Q}_{e,w,i,load,rad} + \dot{Q}_{e,w,rad} - \dot{Q}_{e,w,conv,i,s} = 0 \quad [W] \quad (19)$$

Con

$$\dot{Q}_{e,w,i,load,rad} = \dot{Q}_{i,load,rad} \phi_{rad,i,w} \frac{A_{e,w}}{A_{room,i,s,total}} \quad [W] \quad (20)$$

Donde:

$$\phi_{rad,i,w} = 1 - \phi_{rad,RC} \quad [-] \quad (21)$$

El coeficiente $\phi_{rad,RC}$ es la fracción radiativa de la carga o ganancia térmica interna hacia el techo (calculado a partir de los factores de forma).

Se tiene:

$$\dot{Q}_{i,load,rad} = \dot{Q}_{i,load} \phi_{i,load,rad} + \dot{Q}_{sun,win} \quad [W] \quad (22)$$

Con

$$\phi_{i,load,rad} = 1 - \phi_{i,load,conv} \quad [-] \quad (23)$$

El coeficiente $\phi_{i,load,conv}$ es la fracción convectiva de la carga o ganancia térmica interna (calculado a partir de la información recopilada en ASHRAE [12]). El calor por radiación del sol a través de la ventana se considera en este modelo como una carga interna adicional y se distribuye sobre la superficie interior de las paredes interiores.

Finalmente, el flujo de calor por conducción a través de las paredes puede ser definido como:

$$\dot{Q}_{e,w,in} = \frac{t_{c,e,w} - t_{e,w,i,s}}{R_{e,w,in} - R_{e,w,conv,i,s}} \quad [W] \quad (24)$$

Donde:

$$R_{e,w,in} = \theta_{e,w} R_{e,w,total} \quad [K W^{-1}] \quad (25)$$

Para las paredes internas la metodología es casi la misma, obviamente sin el efecto de la radiación solar y pérdidas infrarrojas con el cielo consideradas en la superficie exterior de la pared.

Para analizar el intercambio de calor de las superficies interiores de las paredes interiores ($\dot{Q}_{w,rad}$) para el caso de un recinto multi-superficie (a diferente temperatura), cada superficie i , del recinto puede ser caracterizada por una radiosidad uniforme acorde a la metodología propuesta en [8]

Ganancias solares y pérdidas infrarrojas

La ecuación utilizada para calcular las ganancias solares y pérdidas infrarrojas a través de las paredes y ventanas exteriores es tomada de Masy, [11] y Bertagnolio *et al.*[6]

La radiación solar absorbida sobre la pared exterior puede ser calculada como:

$$\dot{Q}_{sun,e,w} = \alpha_{e,w} \cdot A_{e,w} \cdot I_{sun,e,w} \quad [W] \quad (26)$$

Donde

$$I_{sun,e,w} = I_{direct,e,w} + 0.5 \cdot I_{glob} \cdot albedo + 0.5 I_{diff} \quad [Wm^{-2}] \quad (27)$$

$$F_{e,w} = \frac{F_{e,w,S} \cdot F_s + F_{e,w,W} \cdot F_W + F_{e,w,E} \cdot F_E + F_{e,w,N} \cdot F_N + F_{e,w,Shadow}}{\sigma_{F_{e,w}}} \quad [-] \quad (28)$$

$$\sigma_{F_{e,w}} = F_{e,w,S} + F_{e,w,W} + F_{e,w,E} + F_{e,w,N} + F_{e,w,Shadow} \quad [-] \quad (29)$$

$$I_{direct,e,w} = (I_{glob} - I_{diff}) \cdot F_{e,w} \quad [W m^{-2}] \quad (30)$$

Las pérdidas infrarrojas pueden ser calculadas como:

$$\dot{Q}_{ir,win,sky} = 0.5 \cdot \epsilon_{ir,win} \cdot A_{win} \cdot I_{ir,h} \quad [W] \quad (31)$$

$$\dot{Q}_{ir,e,w,sky} = 0.5 \cdot \epsilon_{ir,e,w} \cdot A_{e,w} \cdot I_{ir,h} \quad [W] \quad (32)$$

Donde

$\alpha_{e,w}$ es el factor de absorción de la pared exterior, [-].
 $I_{sun,e,w}$ es la radiación solar equivalente sobre la pared exterior, [W m⁻²].

$I_{direct,e,w}$ is the direct radiation reaching vertically the external wall, [W m⁻²].

I_{glob} es la radiación global sobre una superficie horizontal, [W m⁻²].

Albedo es el factor de reflexión del suelo

I_{diff} es la radiación difusa sobre una superficie horizontal, [W m⁻²].

$\epsilon_{ir,e,w}$ es el factor de emisión infrarroja de las paredes opacas.

$I_{ir,h}$ son las pérdidas infrarrojas pre calculadas de una superficie horizontal (obtenidas gracias a la interpolación entre 100 y 145[W m⁻²]). Los valores extremos corresponden respectivamente a cielo sereno o nublado respectivamente [13]

Los factores $F_{e,w}$ son la fracción del área total de la pared exterior en diferentes orientaciones. F representa los factores de proyección de una pared vertical en las orientaciones principales. $F_{e,w,shadow}$ es la fracción de sombreado sobre la superficie de pared exterior. Los factores 0.5 en las ecuaciones 31 y 32 son adicionados debido a que una pared vertical solo "ve" la mitad del cielo. La radiación global y difusa se toman directamente de datos meteorológicos locales.

La ganancia solar a través de las ventanas inyectada directamente en la zona, se compone de radiación directa, difusa y reflejada. Para cada orientación, las tres contribuciones se incluyen en la radiación solar global como:

$$Q_{sun,win} = A_{win} \left[\frac{F_{win,S} \cdot I_{sun,S} + F_{win,W} \cdot I_{sun,W} + F_{win,N} \cdot I_{sun,N} + F_{win,E} \cdot I_{sun,E}}{\sigma_{F_{win}}} \right] \quad [W] \quad (33)$$

Donde los factores F_{win} son la fracción de superficie vidriada en diferentes orientaciones y I_{sun} es la radiación solar global.

El valor $\sigma_{F_{win}}$ es la suma de los factores F_{win} :

$$\sigma_{F_{win}} = F_{win,S} + F_{win,W} + F_{win,E} + F_{win,N} + F_{win,Shadow} \quad [-] \quad (34)$$

Donde $F_{win,shadow}$ es la fracción de sombreado sobre la superficie vidriada.

Las tres contribuciones están incluidas en la radiación solar global para cada orientación $I_{sun,S}$ etc, como:

$$I_{sun,S} = SF_{win,S} \cdot I_{direct,S} + SF_{win,hemis} \cdot (0.5 \cdot I_{glob} \cdot albedo + 0.5 \cdot I_{diff}) \quad [W m^{-2}] \quad (35)$$

$$I_{direct,S} = (I_{glob} - I_{diff}) \cdot F_S \quad [W m^{-2}] \quad (36)$$

Donde $I_{direct,S}$ es la radiación directa sobre una superficie vertical orientada hacia el sur. El coeficiente $SF_{win,S}$ es el factor solar de las ventanas orientadas hacia el sur y $SF_{win,hemis}$ es el factor solar relacionado con la radiación hemisférica (reflejada y difusa).

Se incluyen los factores 0.5 en la ecuación. 35 para tener en cuenta que se trata de una pared vertical que solo “ve” la mitad del cielo.

La radiación global y difusa se toman directamente también en este caso de los datos meteorológicos locales. Los factores solares para la radiación directa globalizan los factores de reflexión, absorción y transmisión de ventanas de doble cristal en un solo valor y se calculan como una función del ángulo de incidencia de la radiación directa y pueden calcularse para una orientación sur por ejemplo relacionada con la radiación hemisférica (reflejada y difusa) como:

$$SF_{win,S} = SF_{win,0} \cdot \left[1 - \tan^p \left(\frac{\theta_s}{2} \right) \right] [-] \quad (37)$$

$$SF_{win,hemis} = f_{hemis} \cdot SF_{win,0} \quad [-] \quad (38)$$

Donde $SF_{win,0}$ es el factor solar normal de la ventana, p y f_{hemis} son los factores de correlación, Svendsen y Laustsen, [14], [15] sugieren $p=3$ y $f_{hemis}=0.86$ para una ventana de vidrio doble de baja emisividad. Finalmente θ es el ángulo de incidencia.

4. CONCLUSIONES

Se presenta un modelo de sistema global Edificio. El modelo considera el componente dinámico de un edificio como Mono-zona.

El modelo del edificio de la mono-zona se basa en circuitos simplificados de primer orden R-C. La red completa de R-C se utiliza para simular el comportamiento térmico de paredes masivas y ligeras, externas e internas.

Se consideran las ganancias solares y las pérdidas infrarrojas a través de las ventanas y paredes opacas, inyectándolas en el nodo de interior o en la superficie externa respectivamente. Otras ganancias internas (ocupación, iluminación y equipos) también se consideran en el cálculo.

La presencia de un techo suspendido incluyendo los conductos de ventilación también se considera en el modelo.

Algunas partes de este modelo global se han validado o se han comparado previamente con los modelos de referencia (modelo del edificio). Sin embargo en un estudio futuro será comparado a otras herramientas de simulación (TRNSYS, CARRIER,... etc.).

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Klein, S.A., Alvarado. F. 2008. Engineering Equation Solver. F-chart software.
- [2] André, Ph., Lebrun, J., Adam, C., Aparecida Silva, C., Hannay, J., Lemort, V. et al. (2006) A contribution to the audit of an air-conditioning system : modelling, simulation and benchmarking. Proceedings of the 7th International Conference on System Simulation in Buildings, Liège, Belgium. Liège : Les Editions de l'Université de Liège.
- [3] Lebrun, J., André, Ph., Aparecida Silva, C., Hannay, J., Lemort, V., Teodorese, V. (2006b) Simulation of HVAC systems : development and validation of simulation models and examples of practical applications. Proceedings of the Mercofrio 2006 Conference, Porto Alegre, Brazil.
- [4] Lebrun, J., Bertagnolio, S., Aparecida Silva, C., Hannay, J. (2007a) Heat pumping and reversible : air conditioning first case study results. Proceedings of the Heat Transfer in Components and Systems for Sustainable Energy Technologies, Heat SET 2007 Conference, Chambéry, France.
- [5] Lebrun, J., Bertagnolio, S., Aparecida Silva, C., Hannay, J. (2007b) Heat pumping and reversible air conditioning; Retrofit Opportunities in a Laboratory Building. Proceedings of the 5th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning, Beijing, China.
- [6] Bertagnolio, S. (2007) Study, modelling and analysis of heat pumping solutions in a commercial building. Master Thesis (June 2007). University of Liège, Liège, Belgium.
- [7] Masy, G. (2006) Dynamic Simulation on Simplified Building Models and Interaction with Heating Systems. Proceedings of the 7th International Conference on System Simulation in Buildings, Liège, Belgium. Liège : Les Editions de l'Université de Liège.
- [8] Fonseca N. 2009. About the Use of Radiant Ceiling Simulation Models as Commissioning Tool. Ph.D Thesis. University of Liege Belgium.
- [9] Lebrun, J. (2006a) Utilisation rationnelle de l'énergie, Climatisation des bâtiments et des véhicules : notes de cours : cours MECA0034-1. University of Liège, Liège, Belgium.
- [10] Incropera F. and DeWitt D. 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Fourth Edition. School of Mechanical Engineering Purdue University.
- [11] Masy G. 2008. Definition and validation of a Simplified multizone dynamic building model connected to heating system and HVAC unit. PhD Thesis. University of Liege. Liege Belgium.
- [12] ASHRAE HANDBOOK. 2009. Fundamentals Atlanta: American Society of Heating, Air-Conditioning and Refrigeration Engineers, Inc.
- [13] Davies M. 2004. Building heat transfer. John Wiley and Sons, Ltd Editors. University of Liverpool.UK.Chapter 4-6.

- [14] Svendsen, S., Laustsen, J.B. (2002) Calculation tool for determining the net energy gain through windows. Building Physics 2002, 6th Nordic Symposium.
- [15] Masy, G., Nicolai, V. (2007) Définition de paramètres forfaitaires pour la modélisation simplifiée des parois. Sisal-Minergibat project working document. Rennequin Sualem high school, Liège, Belgium.