

AUDITORIA ENERGETICA DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO TIPO TECHO EN APLICACIONES HVAC/R.

Commissioning of a cooling ceiling system in HVAC applications

RESUMEN

El sistema de enfriamiento tipo techo de un edificio de tipo comercial en Bruselas Bélgica es experimentalmente evaluado por medio de un procedimiento de ensayo y un modelo de cálculo detallado del sistema. Este modelo es usado en terreno como herramienta de diagnóstico en procesos de auditoría energética (*commissioning*) para determinar el estado de funcionamiento de los principales parámetros de operación sistemas.

El origen del problema: el sobrecalentamiento en algunas zonas del edificio debido a la enorme superficie vidriada. Los sistemas considerados para el *commissioning* son la fachada, el sistema de ventilación y el sistema de enfriamiento tipo techo. Se evalúa la interacción y funcionamiento individual de cada uno de estos sistemas.

PALABRAS CLAVES: Techo frío, HVAC, Auditoría energética

ABSTRACT

The cooling ceiling system of a commercial building in Brussels is experimentally evaluated by means a functional test procedure and a detailed thermal model of this system. This one has to be used on situ, as diagnosis tool in commissioning process in order to determine the main parameters of the cooling ceiling systems.

Due to the extended gazing surface of the building, the problem is the overheated zones submitted to the expected solar heat gain. The subsystems considered for commissioning process includes the fenestration, ventilation and cooling ceiling system. The interaction and individual operation conditions of each system are evaluated.

KEYWORDS: *Cooling ceiling, HVAC, Commissioning.*

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de techo frío consiste básicamente de una superficie radiante conectada a un circuito que contiene agua fría. Mientras que un circuito de aire auxiliar de ventilación es usado para proveer la cantidad mínima de renovación de aire, un segundo circuito de agua fría provee el enfriamiento del edificio. El sistema de techo frío reduce significativamente la cantidad de aire que debe transportarse a través del edificio ya que la ventilación es provista por un sistema de desplazamiento o de mezcla (usualmente solo se requiere 20% de la cantidad de aire de un sistema clásico todo aire [1]). Esto se ve reflejado en una reducción del tamaño de los ventiladores, su consumo energético y sección transversal de los ductos del sistema.

Considerando la extensa de superficie disponible para el intercambio de calor (todo el cielo falso), la temperatura del agua debe ser tan solo ligeramente diferente a la temperatura del recinto a acondicionar; esta pequeña diferencia permite el uso de diferentes tipos de bombas

de calor con coeficientes COP bastante altos y fuentes de energía alternativas, mejorando simultáneamente las condiciones de confort en el local ya que se evitan la generación de corrientes de aire frío molestas generadas por movimiento convectivo del aire.

Los inconvenientes originales del sistema generados por los sistemas de conexión, posibles fugas, riesgo de condensación o condiciones de desconfort por radiación no uniforme, han dado paso a un alto grado de aceptación. Hoy en día existe un creciente interés en la aplicación de esta técnica en sistemas de calefacción con el propósito de reducir costos de inversión por un lado y también para evitar el uso de calentadores en las ventanas, indeseables por razones arquitectónicas.

Es importante considerar sin embargo, que el proceso de *commissioning* es especialmente importante en este sistema, para la detección de un posible mal funcionamiento y su diagnóstico. Esto se debe principalmente al riesgo permanente de condensación, la elevada pérdida de carga, deficiente contacto térmico,

NÉSTOR FONSECA DIAZ

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

JULES HANNAY

Ingeniero de Investigación
University of Liege Belgium.

radiación asimétrica o fugas que pueden presenta el sistema.

Un modelo detallado de diferentes tipos de sistemas de techo frio (desarrollado y validado a partir de datos experimentales [2]) se utilizo en el proceso de *commissioning* descrito en este trabajo como ejemplo.

El análisis teórico utilizado en el modelo permite su utilización como herramienta de diagnostico durante el proceso de *commissioning* basándose solamente en la geometría y características del sistema y la medición de sus condiciones básicas de operación.

2. DESCRIPCION DEL EDIFICIO



Figura 1. Detalles del edificio

El edificio considerado en este ejemplo tiene un total de 38 pisos y un área de 87200m². La fachada está compuesta por 6000 ventanas. Las paredes internas están hechas de vidrio de seguridad. Algunos detalles de la fachada y las ventanas se indican en la Figura 1.

La fachada está compuesta por una unidad vidriada exterior de doble vidrio y un panel interior en vidrio simple. La cavidad entre las dos superficies es ventilada con aire de retorno del local, el cual se extrae desde la base de la ventana y se envía hacia el sistema de ventilación desde la parte superior. El sistema posiciona el mecanismo de sombreado (persiana) ubicado entre las dos superficies vidriadas acorde a la posición del sol, para capturar la energía irradiada dentro de la cavidad. La energía puede luego por lo tanto ser eliminada por el sistema de ventilación en verano o recobrada durante el invierno como energía de calefacción.

Descripción del techo frio.

El sistema de techo frio utilizado en la oficina del edificio seleccionada para este estudio está compuesto por una estera de tubos capilares (D_c=3.4 mm and D_i =2.3 mm)

sobrepuestos sobre una placa metálica perforada usada como techo falso (Figura 2).

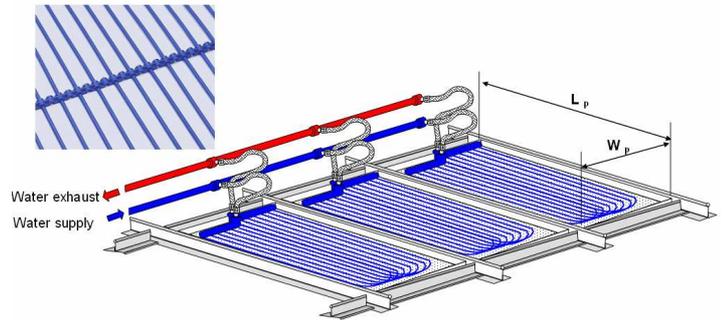


Figura 2. Detalles de un sistema de techo frio mediante tubos capilares en U.

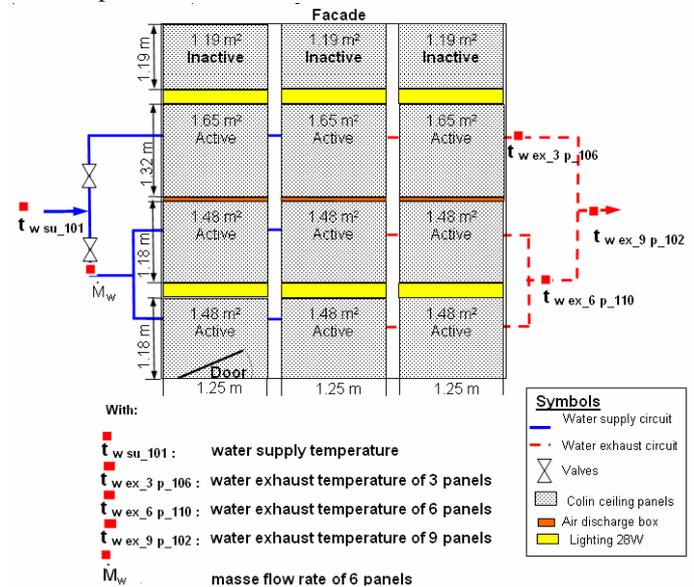


Figura 3. Detalles del sistema de techo frio en estudio.

La distancia entre los tubos capilares por los cuales fluye el agua fría es suficientemente pequeña (10 mm) para asegurar una temperatura homogénea de la superficie radiante de la placa metálica en contacto con el aire ambiente del local. La estera de tubos capilares tiene una configuración en “U”, se utiliza una capa de aislante (25 mm de lana mineral) sobre los tubos. El sistema de ventilación e iluminación se integran a los paneles del techo frio (Figura 3).

3. MEDICIONES

Durante el proceso de *commissioning* se deben efectuar las siguientes mediciones (Figura 3 y 4):

- t_{w, su} , t_{w, ex} : Temperatura de entrada y salida del agua, °C .
- M_w : Flujo de agua, kg/s.

- $t_{res, room}, t_{a, room}$: Temperatura resultante y del aire en el local, °C.
- $t_{a, void}$: Temperatura del aire en el entretecho, °C.
- L_p, L_{room} : Longitud del panel y del local, m.
- W_p, W_{room} : Ancho del panel y del local, m.
- H_{oom} : Altura del local, m.
- $t_{c s ave}$: Temperatura superficial del techo frio, °C.

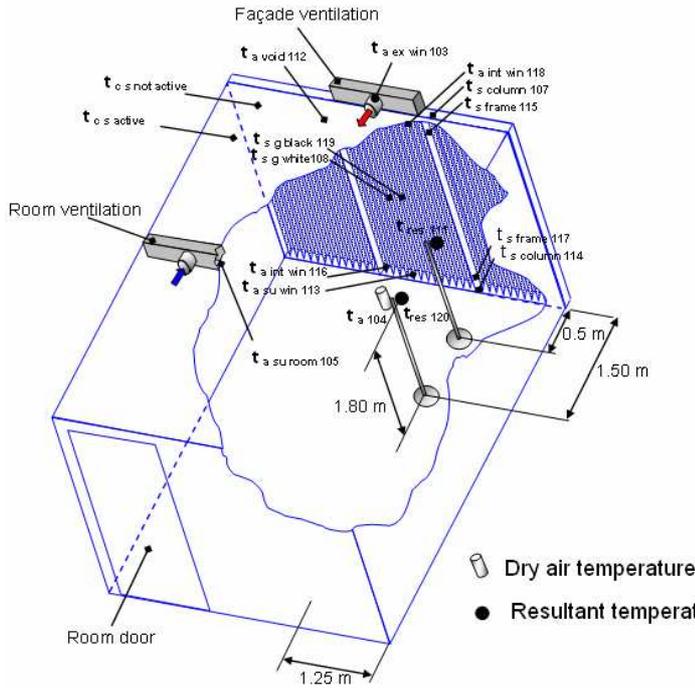


Figura 4: Posición de los sensores en el local

Para evaluar el funcionamiento del sistema de ventilación y la fachada, se mide la temperatura superficial y del aire en diferentes puntos. La posición de los sensores dentro del local se indica en la Figura 4.

Resultados del proceso de *commissioning*.

En la primera inspección visual del sistema se observó que los paneles del techo frio cercanos a la fachada estaban “inactivos” y 4 de los 9 paneles “activos” fueron instalados con esteras de tubos más cortas que la superficie metálica del panel, lo que implica una reducción directa de la superficie activa de enfriamiento. El flujo de agua y caída de presión nominales para las condiciones de operación del sistema de techo frio bajo estudio, deben ser de 0.053 kg/s y 0.6 kPa respectivamente (acorde a la documentación del fabricante del sistema); sin embargo el flujo de masa medido es 3.15 veces mayor. Esto no afecta directamente la capacidad de enfriamiento del sistema, sin embargo la caída de presión del sistema aumenta a 1.65 kPa. La caída de presión es importante considerando que el

consumo de energía del sistema de bombeo es significativo en este caso y el COP del sistema puede ser mejorado significativamente si se selecciona correctamente el flujo de agua y se minimizan las pérdidas de presión en el sistema durante el proceso de *commissioning*.

Los resultados promedio de mediciones efectuadas el 13 de Mayo de 2008 (primavera) desde las 11 h hasta las 13 h se resumen en las Tablas 1 y 2.

Se observa principalmente un fuerte calentamiento de la fachada (aire y estructura de las ventanas) considerando que se trata de una estación intermedia, el problema del sobrecalentamiento podría ser insoportable para los ocupantes durante el verano.

Los datos suministrados por el fabricante pueden ser usados para efectuar la identificación de parámetros preliminar del modelo. Se obtiene de esta identificación la resistencia de contacto entre los tubos y la placa metálica y el coeficiente convectivo entre la placa metálica y el aire del local considerando que el sistema de ventilación afecta la transferencia de calor del techo frio. En este ejemplo sin embargo el modelo está disponible y fue validado previamente a partir de datos experimentales siguiendo la norma DIN 4715 [3,4,5] para una estera de tubos capilares en “U” sobre una placa metálica perforada. Si se utiliza este modelo y los datos experimentales presentados en la Tabla 1 con la temperatura de referencia ubicada a 1.5 m de la fachada, los resultados del proceso de *commissioning* pueden observarse en la Figura 5. La comparación entre los valores calculados por el modelo y las variable medidas para este proceso se presentan en la Tabla 3.

Tabla 1 Proceso de Commissioning: Resultados promedio de mediciones en el techo frio.

Subsistema	Variable	Resultado
Techo frio 6 paneles	$t_{w, su}$	14.7 °C
	$t_{w, ex}$	15.9 °C
	\dot{M}_w	0.183 kg/s
	$t_{res, room 120 (1.5 m)}$	26.2 °C
	$t_{res, room 111 (0.5 m)}$	28.5 °C
	$t_{a, room (1.5 m)}$	25.5 °C
	$t_{a, void}$	25.2 °C
	$t_{cc ave}$	18.7 °C
	L_p	1.25 m
	W_p	1.18 m
	L_{room}	5.15 m
	W_{room}	4 m
	H_{oom}	2.58 m

Table 2: Proceso de Commissioning: Resultado de mediciones en la fachada y sistema de ventilación.

Subsistema	Variable	Resultado
Fachada	$t_{s \text{ column } 107}$	41.7 °C
	$t_{s \text{ frame } 115}$	46.4 °C
	$t_{s \text{ frame } 117}$	32.9 °C
	$t_{s \text{ column } 114}$	28.2 °C
	$t_{a \text{ int win } 118}$	44.8 °C
	$t_{a \text{ int win } 116}$	36.6 °C
	$t_{cc \text{ s not active}}$	28.9 °C
	$t_{s \text{ g black } 119}$	35.1 °C
	$t_{s \text{ g white } 108}$	35.5 °C
	$t_{a \text{ su win } 113}$	25.7 °C
	$t_{a \text{ ex win } 103}$	44.9 °C
Sistema de ventilacion	$t_{a \text{ su room } 105}$	16.8 °C
	Supply air overpressure principal duct	+13 Pa
	Return air depression principal duct	-64 Pa
	Return air depression window exhaust	-4 Pa

Table 3: Comparación entre el resultado de mediciones y los valores calculados por el modelo.

Variable	Valor medido	Calculado
$t_{cc \text{ s ave}}$	18.7 °C ± 0.5 °C	19.5 °C
$t_{w \text{ ex}}$	15.9 °C ± 0.25 °C	16 °C
\dot{Q}_{system}	919 W ± 270 W	1020 W

Se puede observar que la emisión del sistema de techo frio estimada experimentalmente esta dentro de los limites esperados para el sistema (acorde a la documentación del proyecto), sin embargo debido al elevado flujo de agua impuesto en el sistema (0.183 kg/s), la variación de la temperatura del agua entre la entrada y la salida del sistema es muy pequeña (1.2 K) por lo tanto se presenta una incertidumbre significativa en el resultado de la capacidad de enfriamiento considerando que la precisión con la que se mide esta temperatura para esta aplicación en particular es de 0.2-0.3 K (termocuplas tipo T en tuberías) [6,7,8]. Esto dificulta el análisis durante el proceso de *commissioning*.

Acorde con los resultados experimentales (*commissioning* y laboratorio) [9, 10, 11], se observa una importancia significativa de la fachada sobre el

rendimiento térmico del sistema de enfriamiento mediante techo frio.

Para el caso estudiado como ejemplo, la capacidad de enfriamiento es insuficiente considerando el sobrecalentamiento cerca de la fachada.

Las soluciones posibles al problema sería la activación de los paneles cerca de la fachada (considerando que esta zona es la más afectada por el sobrecalentamiento no se explica porque fueron suprimidos) y también el uso de una protección adicional móvil (sistema de sombreamiento) transparente a la luz visible pero opaca a la radiación infrarroja, con el objetivo de reducir el sobrecalentamiento de la zona de ocupación.

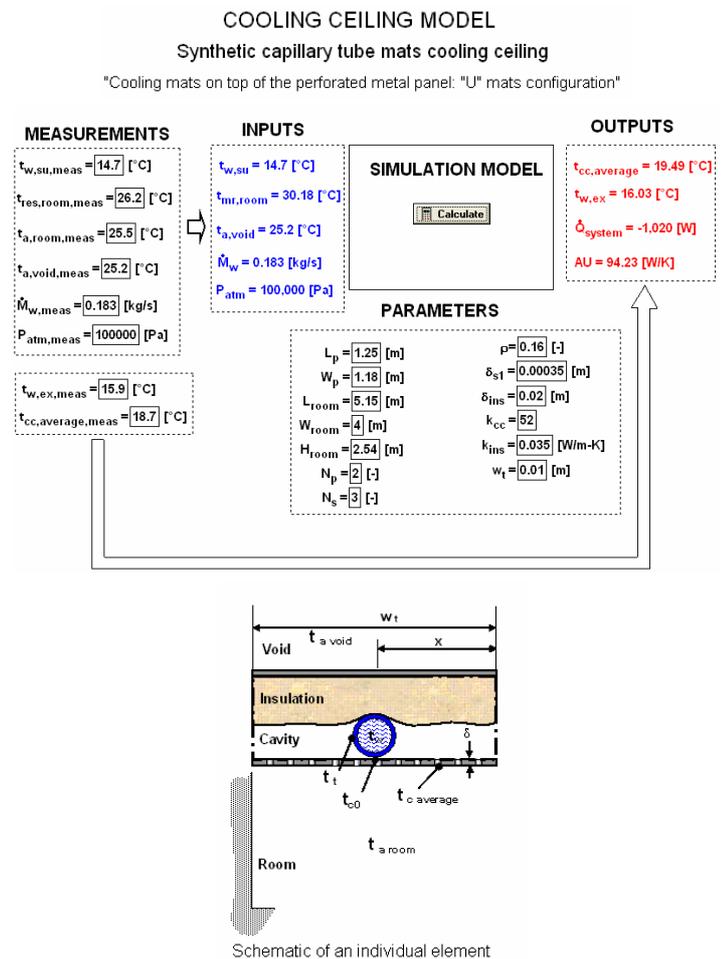


Figura 5. Diagrama de bloque de modelo de techo frio (EES software): Resultados de *commissioning*.

6. CONCLUSIONES

Se presenta en este artículo un estudio de *commissioning* de sistemas de enfriamiento por techo frío mediante un modelo desarrollado como herramienta de diagnóstico en este tipo de aplicaciones. Se encontró que debido a una reducida diferencia de temperatura del agua de alimentación (característica del sistema) la incertidumbre de medición juega un papel significativo en la evaluación de los resultados del proceso de *commissioning*.

Es importante remarcar también que a pesar de las herramientas cada vez más sofisticadas con que cuentan este tipo de instalaciones (HVAC) en edificios (sistemas de monitoreo control y medición integrados); un inadecuado proceso de instalación, verificación y administración del sistema y componentes (acorde a lo estipulado en la documentación del proyecto del edificio), provoca por lo general el deterioro progresivo de los componentes y del sistema y la subutilización de los costosos sistemas de monitoreo y control.

Los resultados del proceso de *commissioning* indican que la influencia de la distribución de la carga térmica en el local seleccionado para este análisis (especialmente la influencia de la fachada) es considerable. Por lo tanto la aplicabilidad de cierta concentración de carga térmica debe corresponder al caso de estudio (condiciones de laboratorio deben corresponder a condiciones reales de ensayo) y el techo frío debe ser evaluado con sus condiciones ambientales de operación y no como un elemento separado del equipo HVAC.

NOMENCLATURA

c	Calor específico [J/kg-K]
C	Constante [-]
D	Diámetro [m]
H	Altura [m]
L	Longitud [m]
\dot{M}	Flujo de masa [kg/s]
\dot{Q}	Flujo de calor [W]
t	Temperatura [°C]
ΔT	Diferencia de temperatura [K]
ΔP	Diferencia de presiones [Pa]
W	Ancho [m]
w	Distancia entre tubos capilares [m]

Subíndices

a	Aire
ave	Promedio
c	Techo
cc	Techo frío
g	Vidrio
i	Interno
e	Externo
meas	Medido
n	Constante
p	Presión, panel
res	Resultante

su	Suministro
s	superficie
t	Tubo
void	Aire en la cavidad sobre el techo frío
w	Agua o pared.
win	Ventana

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Conroy C. and Mumma S. 2005. Ceiling Radiant Cooling Panels as a viable distributed Parallel Sensible Cooling Technology integrated with dedicated Outdoor air Systems. ASHRAE transactions, 107. Part 1 AT-01-7-5.
- [2] Fonseca N. 2008. Tesis de Doctorado. Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools. University of Liege. Liege Belgium.
- [3] DIN 4715. 1993. Entwurf, Raumkühlflächen; Leistungsmessung bei freier Strömung; Prüfregeln, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [4] Feustel H. and Stetiu C. 1995. Hydronic radiant cooling- preliminary assessment. Energy and Building. Vol 22. p.p. 193-205.
- [5] FTZ Forschungs-und Transferzentrum e.V and der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH). 2003. 2002. Prüfbericht über die Ermittlung der Kühlleistung einer Raumkühlfläche nach DIN 4715-1. Prüfbericht Nr.:FTZ_2003_KF1022.
- [6] Fissore A. and Fonseca N. 2007. Experimental study of the thermal balance of a window, design description. Building and Environment. Vol. 47. p.p. 3309-3321.
- [7] Hannay J. Hannay C. 2008. Building Commissioning results rapport. Laboratoire de thermodynamique applique Université de Liège.
- [8] AuditAC 2006. Successful case Studies in AuditAC. Technical Guides for owner/manager of HVAC systems. Vol 10.
- [9] Behne M. 1996. Is there a risk of draft in rooms with cooled ceilings. Measurement of air velocities and turbulences ; ASHRAE Transactions: Symposia – SD 96-4-5; p.p 744-751.
- [10] International Energy Agency (IEA). 2003 “Commissioning of Building and HVAC systems for improve energy performance”. Annex 40 Final report.
- [11] Ternoveanu A, Hannay, C, Qingping, W. 1999. Preliminary Analysis on a Research Project for Cooling Ceilings- synthesis of available information. Laboratoire de thermodynamique applique Université de Liège.