

MODELO PARA EL CÁLCULO DE LA PERDIDA DE CALOR POR UNA VENTANA EN APLICACIONES HVAC/R.

Model for heat losses calculation through a window useful to HVAC/R applications

RESUMEN

Este artículo presenta un modelo para calcular la pérdida de calor en una ventana incluyendo el efecto de las cortinas o persianas. Para su validación experimental, se ha diseñado y construido un banco de pruebas, con el cual se simula el comportamiento térmico de un local, inserto dentro de un edificio con solo un muro y ventana expuesto al medio ambiente exterior. Se dan a conocer sus principales características de diseño, sistemas de medición, experiencias implementadas durante un año de mediciones y el resultado del análisis de incertidumbre correspondiente a cada variable, con el cual se calcula finalmente la incertidumbre estimada en los resultados.

NÉSTOR FONSECA DÍAZ

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
nfonseca@utp.edu.co

JEAN MICHEL MOTTARD

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Universidad de Liege Bélgica
jm@mottard.be

PALABRAS CLAVES: Temperatura del aire, instrumentación, análisis de incertidumbre.

ABSTRACT

This paper present a model to calculate the heat lost through a window including the effect of curtains or blinds. For its experimental validation, it has been designed and constructed a test bench, with which the thermal behavior of a room insert into the building with one wall and window exposed to outside climatic conditions is simulated. Its main characteristics of design, measurement system, experiences implemented during a year of measurements and corresponding uncertainty analysis results of each variable, with which calculating the final uncertainty in the results are shown.

KEYWORDS: Air temperature, instrumentation, uncertainty analysis.

1. INTRODUCCIÓN

En el balance térmico de un recinto, las ventanas han sido generalmente consideradas, solo como causantes de pérdidas netas de calor. Es decir que las ganancias debidas al sol, son inferiores a las pérdidas debidas a la diferencia de temperatura interior y exterior. Para condiciones climáticas de gran parte del hemisferio norte (inviernos muy fríos), de donde provienen la mayoría de estudios sobre el tema [1], esto podría ser valido. Sin embargo, para muchas zonas del hemisferio sur, donde el invierno es mucho más templado, el balance podría ser diferente. Considerando lo anterior, seria muy útil analizar en detalle el balance térmico de una ventana, ya que permitiría mediante una modificación en el diseño arquitectónico (orientación, protecciones interiores y tamaño de las ventanas) generar una reducción significativa en el consumo de energía de calefacción [2]. Con este objetivo, se creo un modelo de cálculo teórico para el diseño térmico de ventanas de vidrio simple, adaptado especialmente para inviernos de climas templados. El modelo considera la relación entre la ventana y el medio ambiente interno y externo, lo que

implica que se debe simular también el resto del edificio. Para su validación experimental, se ha diseñado y construido un banco de pruebas.

Se requieren para la validación experimental del modelo matemático, mediciones muy precisas que permitan mejorar la calidad de sus resultados, dado que las diferencias entre las ganancias y las perdidas de calor a través de la ventana, que indicarían si se puede modificar su diseño, son pequeñas [3]. Esto implica un adecuado diseño de los sistemas de medición asociados.

Actualmente existen muchos estudios desarrollados a nivel de laboratorio, que buscan caracterizar un determinado tipo de ventana mediante el coeficiente global de transferencia de calor U, pero no permiten calcular su balance térmico, dado que no consideran la influencia del recinto [4,5,6,7,8,9].

El objetivo de este artículo es dar a conocer el modelo matemático, las principales características de diseño del banco de ensayos, los sistemas de medición y tipos de experiencias implementadas, durante un año de mediciones, así como el resultado del análisis de incertidumbre correspondiente a cada variable, con el

cual se calcula finalmente la incertidumbre estimada en los resultados.

2. BALANCE TÉRMICO DE UNA VENTANA

La Figura 1 muestra las variables involucradas en el balance térmico del vidrio de una ventana, incluyendo el efecto de una superficie o cubierta de protección usualmente utilizada.

Nomenclatura

- T_{mr}: Temperatura media radiante
- T_{av}: Temperatura del aire entre el vidrio y la protección.
- T_v: Temperatura del vidrio
- hc: Coeficiente convectivo

Subíndices:

- a Aire.
- a.e Aire exterior.
- a.i Aire interior.
- c Cielo - cable.
- e Entrada.
- eq Equivalente.
- e- Entrecámara.
- ex Exterior.
- in Interior.
- os Superficie que intercambia calor.
- p Protección. - Pared. - Placa. - Piso.
- s Salida. - Sensor.
- v Vidrio. - Ventana.

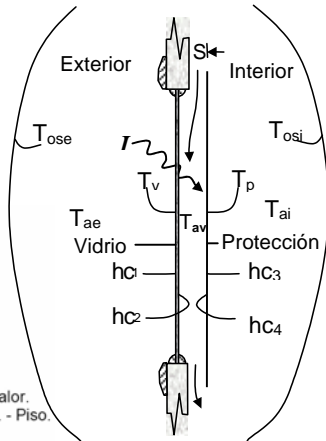


Figura1. Balance térmico de la ventana

El balance de calor para el vidrio, despreciando la variación de su energía interna, se plantea en la ecuación [1]. En ella se presentan 3 incógnitas T_v, T_{av}, T_{mrt1}. Se requiere por lo tanto conocer el balance térmico sobre el elemento usado como protección y sobre el aire semi confinado en la ventana, planteados en las ecuaciones [2] y [3] (los subíndices 1 y 2 corresponden a las superficies exterior e interior del vidrio, los 3 y 4 al interior y exterior de la protección).

T_{mrt1} está influenciada por la temperatura de las superficies que “ve” el vidrio hacia el interior (protección interior y marco), mientras que T_{mrt2} por las que “ve” la protección en el espacio semiconfinado (vidrio y marco). Finalmente, T_{mrt3} está influenciada por las superficies que “ve” la protección del lado interior al recinto (paredes interiores del recinto). Esta última se calcula a partir del balance térmico del recinto en régimen transiente. Para simular en forma detallada todas las paredes del recinto se utiliza el método de los elementos finitos.

$$I\alpha_{eqv} + \frac{Q_{s}}{\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{A_1}{A_v} \frac{1}{1-\epsilon_1}} + \frac{Q_{Rad\ in}}{\epsilon_1} + hc_2(T_{av} - T_v) - \frac{Q_{conv\ in}}{\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{A_{ose}}{A_v} \frac{1}{1-\epsilon_{ose}}} - \frac{Q_{Rad\ ex}}{\epsilon_{ose}} - \frac{Q_{conv\ ex}}{hc_1(T_v - T_{ae})} = 0$$

[2]

$$T_v \alpha_{eqp} + hc_4(T_p - T_{av}) + \frac{\sigma(T_p^4 - T_{mrt2}^4)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{A_p}{A_2} \frac{1}{1-\epsilon_2}} = hc_3(T_{ai} - T_p) + \frac{\sigma(T_{mrt3}^4 - T_p^4)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{A_p}{A_3} \frac{1}{1-\epsilon_3}}$$

$$[3] \quad hc_4(T_p - T_{av}) = hc_2(T_{ai} - T_v) + mC_p(T_e - T_s)$$

Los factores α_{eqv} y α_{eqp} , representan las absorptividades equivalentes del vidrio y la protección interior, que consideran las múltiples reflexiones de la radiación solar sobre éstas superficies. Parámetros como hc₂, hc₃, \dot{m} flujo masico de aire que entra al espacio entre la protección y la ventana y su temperatura de entrada y salida T_s, T_e, son bastante difíciles de estimar en forma teórica, por lo tanto, se obtienen en forma empírica de un trabajo previo [3]. Su efecto sobre el resultado es importante; una estimación inadecuada generaría resultados deficientes. Por otro lado, en el flujo de calor por radiación exterior, la dificultad radica en la estimación de T_{ose}, que generalmente se simplifica aproximándola como T_{ae}, sin embargo esto sólo es válido para cielos nublados.

Las anteriores ecuaciones son una síntesis del modelo de cálculo teórico para diseño térmico de ventanas, creado en el marco del proyecto de investigación. Las variables de entrada del modelo son la temperatura del aire exterior, la radiación solar sobre el plano de la ventana, la velocidad y dirección del viento, la temperatura de los recintos adyacentes, el flujo de aire de infiltración y su temperatura, la nubosidad y la radiación infrarroja hacia el cielo en la noche. Como salidas, el modelo entrega la potencia de calefacción requerida en el caso de activar este sistema, las temperaturas superficiales interiores (vidrio, paredes y protección) y por último la temperatura del aire interior del recinto incluyendo el espacio de aire entre el vidrio y la protección. Es importante aclarar que el balance sobre la ventana mostrado previamente, no considera la eventualidad de condensado en la superficie interior del vidrio o las gotas de lluvia en el exterior, es decir, no considera el cambio de fase; por lo tanto se deben determinar durante la fase experimental los períodos de tiempo en los cuales se presentan estas condiciones, para ver si se producen distorsiones importantes o no.

3. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS.

Se pretende recrear el comportamiento térmico de un local (recinto de prueba), inmerso dentro de un edificio, con sólo una pared exterior (fachada donde se ubica la ventana). En general, el diseño del banco de ensayos busca hacer que el intercambio de calor a través de la ventana sea significativamente mayor a los demás flujos de calor presentes en balance térmico del recinto, aumentando así la precisión en el balance térmico de la ventana. Para lograr este objetivo se implementan las siguientes medidas en su diseño:

Como se tienen intercambios de calor por radiación y convección y ambos son del mismo orden de magnitud, de la teoría de modelos se sabe que este problema no se puede trabajar a escala reducida, por lo tanto se construye el banco de ensayos a escala natural (1:1).

La ubicación y orientación del banco de ensayos, elimina el efecto de sombra de otras construcciones y permite una mayor incidencia de la radiación solar sobre el recinto.

Para simular los recintos adyacentes calefaccionados en un edificio, las paredes interiores incluso el techo y el piso, se encuentran rodeadas por un espacio de aire o entrecámara que simula los recintos adyacentes acondicionados. En ella, se hace circular aire mediante ventiladores y se controla su temperatura para que sea la misma del local, minimizando de esta forma las pérdidas de calor hacia la entrecámara y el efecto de la radiación solar. Además se obtiene una temperatura bien definida, que se utiliza como variable de entrada para el modelo matemático.

Para lograr un mayor flujo de calor por el panel de la fachada, este se compone de un tabique de madera con solo 5 cm de poliestireno expandido como aislante, mientras que las paredes interiores y exteriores de la entrecámara se aíslan con 9 cm.

Se cuenta con un sistema de impulsión de aire exterior, con el cual se mantiene el recinto de prueba en sobre presión, mediante la inyección de un pequeño flujo de aire exterior. De esta forma, se puede controlar y medir la cantidad de aire exterior que ingresa al recinto e ingresarlo como dato al problema.

El diseño del banco de ensayos permite finalmente, la modificación del tipo y tamaño de la ventana, así como las características del muro de la fachada y capacidad térmica en el interior del recinto. Esto se logra, mediante la implementación de un panel modular en la fachada que permite su fácil remoción, así como un sistema de fijación que permite instalar capas adicionales de diferentes materiales en el muro de fondo y el piso.

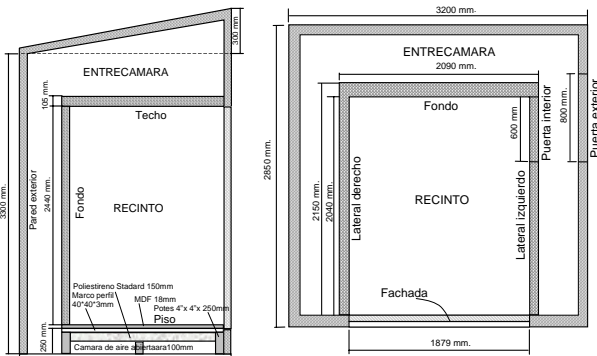


Figura 2. Planos y fotografía del banco de ensayos

4. TIPOS DE MEDICIONES

Básicamente se realizan dos tipos de experiencias; con calefacción (invierno) y sin calefacción (verano). En ellas se modifican alternativamente algunas condiciones del banco de ensayos, como el tipo de elemento de protección interior en la ventana e inercia térmica del recinto. Cada configuración se mantiene por periodos aproximados de 10 a 20 días (las 24 horas). Sin embargo, para el caso de elementos tradicionales de protección como la persiana y cortina, durante una parte del invierno, se evalúa el caso real de una vivienda, en la que se mantiene la ventana descubierta solo durante el día.

Medición de condiciones límite Corresponden a las condiciones de borde del modelo matemático o variables de entrada que tendrá durante su fase de validación experimental. Temperatura exterior. Radiación solar en el plano vertical. Flujo de aire de ventilación. Radiación infrarroja hacia el ambiente en la noche. Temperatura del aire en la entrecámara. Temperatura de las paredes de la entrecámara. Velocidad y dirección del viento. Nubosidad*. Consumo de energía sensor radiación nocturna*.

Mediciones de comparación: Utilizadas para la validación experimental propiamente dicha: Estado del sistema de calefacción (on-off). Temperatura del aire interior. Temperatura de las superficies interiores del recinto de prueba. Consumo de energía de calefacción*.

Mediciones de verificación: Utilizadas para detectar de donde vienen las posibles diferencias, entre los ensayos y la simulación y para calcular cada uno de los componentes del balance de calor. Temperaturas de las superficies interiores del recinto de prueba. Temperatura del aire en la entrecámara. Temperatura del vidrio. Temperatura del aire entre la persiana y el vidrio. Radiación solar en el plano horizontal. Flujo de calor en la pared de la ventana. Temperatura del aire de ventilación a la entrada del recinto. Temperatura de la calefacción. Humedad Relativa.

Todas las mediciones (excepto *) son registradas en sistema de adquisición de datos, las señaladas con (*) se registran manualmente mediante observación periódica de las condiciones climáticas y lectura de sensores análogos.

5. UBICACIÓN DE LOS SENSORES

Parte importante del proceso de instrumentación del banco de ensayos, consiste en una adecuada distribución de los sensores, que permita efectuar mediciones representativas del comportamiento de cada una de las variables requeridas.

Para visualizar mejor la distribución de las mediciones en el banco de ensayos, se subdividen en interiores (dentro del local) y exteriores (entrecámara y ambiente exterior) (ver Figura 3).

6. DESCRIPCIÓN DE LAS EXPERIENCIAS REALIZADAS

Se consideran dos tipos de experiencias:

Con temperatura interior mínima constante (situación típica de invierno). Con temperatura interior variando libremente (condiciones de verano).

En cada una se modifican algunas condiciones del banco de ensayos, como los elementos de protección en la ventana, el nivel de infiltraciones de aire y la inercia térmica del recinto. Se espera de esta manera, obtener resultados representativos de una amplia gama de situaciones con las cuales desarrollar la validación experimental del modelo y analizar el comportamiento térmico de la ventana, respecto a su entorno, en especial el clima y elementos de protección interior utilizados.

Las mediciones se efectuaron durante un año, generando modificaciones y mejoras en su operación. Por ejemplo, el sistema de impulsión de aire de ventilación, inicialmente contaba con un ventilador de motor interior (en contacto con el aire) y un flujo del orden de 1,52 Ren/h. Debido al calentamiento excesivo del aire al entrar en contacto con el motor, se modificó el sistema incorporando un ventilador de motor exterior. En forma paralela, se mejoró el sello de la cámara, lo cual permitió reducir el flujo de aire inyectado a sólo 0,65 Ren/h y mantener una diferencia de presiones del orden de 25 Pa. (dentro del límite utilizado para éste tipo de aplicación). Existen por lo tanto, diferencias apreciables en el desarrollo experimental, las cuales deben ser consideradas en el análisis. En general las modificaciones realizadas para cada experiencia son:

Uno alternativo de diferentes tipos de protección interior en la ventana y la ventana sin protección, durante varios días, las 24 horas.

Incremento de la inercia térmica del recinto, repitiendo los ensayos anteriores.

Para el período con mayor inercia térmica, se efectúan experiencias adicionales sin protección en la ventana durante el día y persiana ó cortina cerrada en la noche.

La posición del sensor de radiación nocturna para cada tipo de experiencia se alternó de horizontal a vertical.

Se listan en la Tabla 1 en forma general, los tipos de experiencias realizadas y sus características más relevantes.

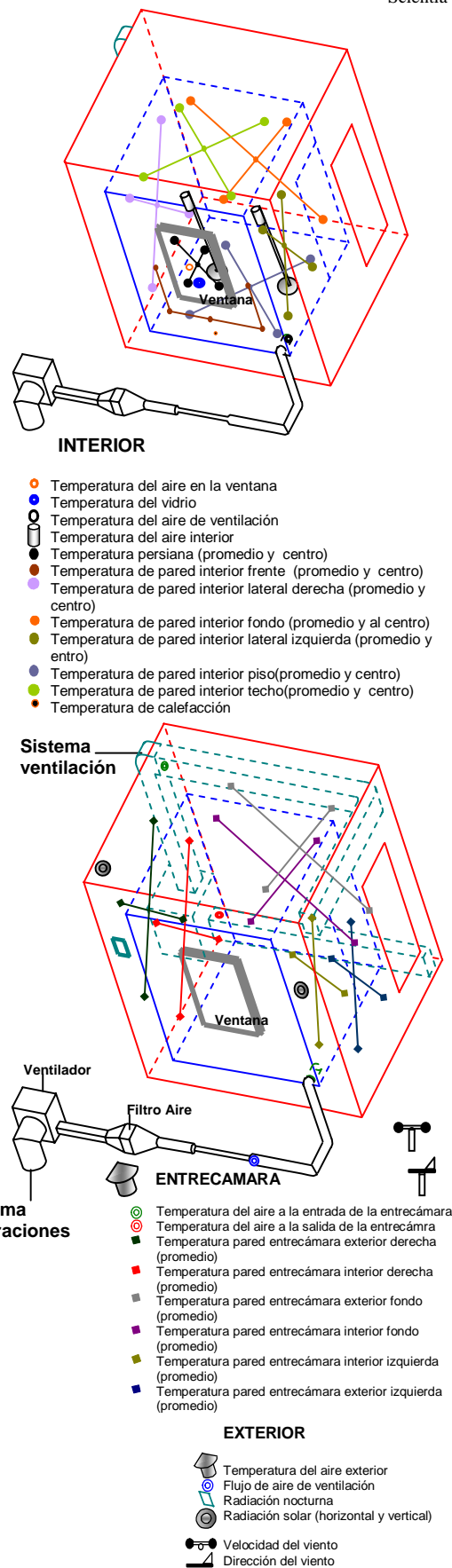


Figura 3. Ubicación de sensores en el banco de ensayo

Calefacción		Infiltración		Condición Climática				Protección ventana			+Piso		
SI	NO	SI	NO	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Sin protección	Persiana	Cortina	Placa de Aluminio	Placa de Aislante	

Tabla 1. Listado general de ensayos realizados

7. TIPOS DE ENSAYOS

Se describen a continuación en forma general los tipos de experiencias realizadas.

Persiana: Persiana de PVC, blanca, de 0,85m *1,20 m. Las laminas siempre en la misma posición.

Ubicación:

A 5 cm del borde del marco, distribuida en forma simétrica con respecto al marco. Esto permite al aire circular de la habitación hacia el espacio entre la persiana y el vidrio.

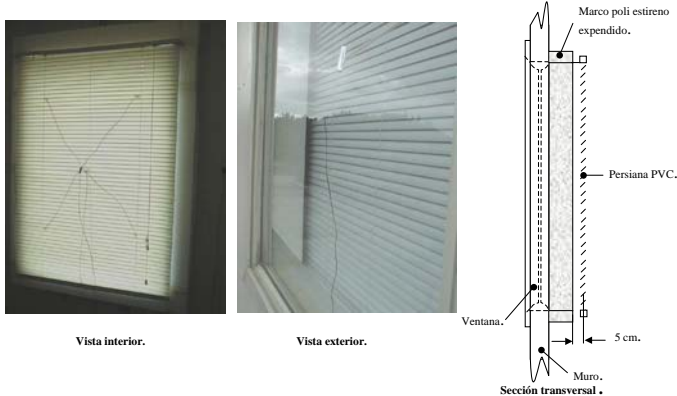


Figura 4. Ensayo con persiana en PVC

Cortina: Cortina tradicional de tela color azul, soportada por rieles de aluminio y un velo entre la cortina y el vidrio. En ambos casos se permite la formación de los pliegues convencionales.

Ubicación:

A 5 cm del borde del marco cubriéndolo totalmente.

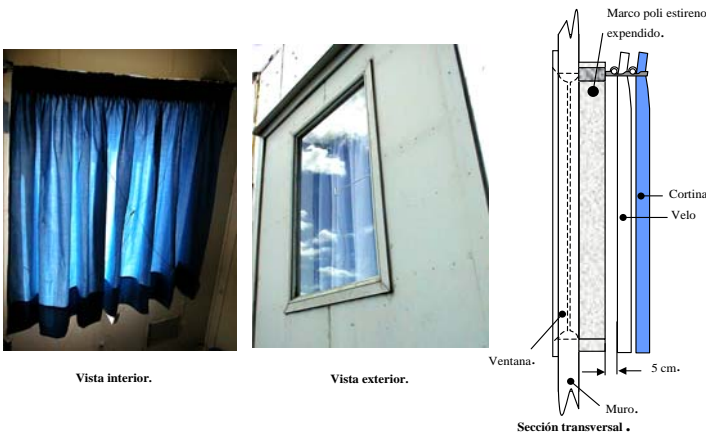


Figura 5. Ensayo con cortina y velo.

Placa Aluminio: Lámina de aluminio de 1.2*0,85m y 0,2 mm de espesor, soportada por un marco de madera de 1cm* 1cm de área transversal.

Ubicación:

A 5 cm del borde del marco y distribuida en forma simétrica

Al unir la placa al marco se realizan experiencias en que el espacio de aire entre el vidrio y la placa se comporta como una cavidad.

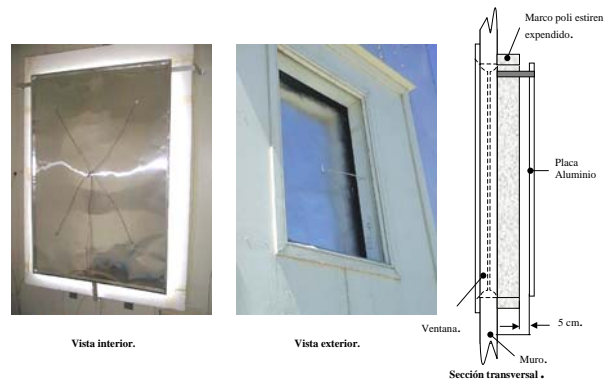


Figura 6. Ensayo con placa de aluminio pulido y brillante

Placa de Aislante: Se utiliza una lámina de aislante de 10*120*80 cm.

La cual se incrusta dentro del marco de aislante tradicional.

La lámina se bisela para lograr unirla al vidrio, evitando el obstáculo del porta vidrio, para impedir que se forme un espacio de aire entre la placa y el vidrio.

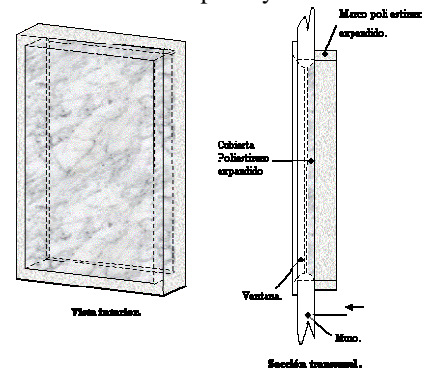


Figura 7. Ensayo con placa de aislante

Sin protección: Se conserva el marco de aislante

Piso: Baldosas cerámicas de 20 *20 *5 cm, unidas mediante una mezcla de yeso y agua.

Peso: Baldosas 513 Kg. Mezcla 6,4 Kg. Plástico 0,7 Kg. Se prueban nuevamente los diferentes tipos de cubierta en la ventana y el caso sin protección, para esta condición.



Figura 8. Ensayo con piso de alta inercia térmica

En el ensayo con placa de aislante se busca eliminar completamente la influencia del sol y las pérdidas en la

noche a través de las áreas vidriadas. Es decir, observar el comportamiento del banco de ensayos sin ventana. Para verificar condiciones teóricas, debido a que los efectos de la radiación solar pueden ser muy complejos.

En las experiencias con mayor inercia térmica, se busca además determinar la influencia de este factor en el consumo de calefacción. Para esta condición se efectúan adicionalmente mediciones manteniendo la ventana descubierta durante el día y cubierta en la noche con cortina o persiana. Se pretende evaluar estos tipos de protección interior y el efecto de la ventana para el caso real en una vivienda

7. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

Se presenta a continuación el resultado final del análisis de incertidumbre en cada una de las variables que intervienen en ensayo experimental, con el cual se da validez a los resultados en las pruebas y validación experimental del modelo [1].

Variable	Incertidumbre expandida U total.
Temperatura promedio del aire interior.	+/- 0,88K.
Temperatura promedio del aire exterior.	+/- 0,47K.
Flujo de aire de ventilación.	+/- 12,2% de la lectura.
Radiación nocturna	Horizontal: +/- 5,9% lectura.
	Vertical: +/- 6,1% lectura.
Potencia de calefacción	Consumo diario >500Wh. +/- 12,6% lectura.
	Consumo diario <1000Wh. +/- 21% de la lectura.
Radiación solar	Vertical +/- 5,1% lectura.
	Horizontal +/- 8,4% lectura.
Temperatura superficial del vidrio	Día: +/- 1,23K.
	Noche: +/- 0,8K.
Temperatura superficial de las paredes	Fachada: +/- 1,1 K.
	Interiores: +/- 0,6K.
	Entrecámara: +/- 1,2K.
Velocidad y dirección del viento	Velocidad: +/- 0,42 m/s.
	Dirección: +/- 10,9°
Flujo de calor en pared de la ventana.	+/- 4.3% lectura
Riesgo de condensación en el vidrio.	+/- 1,6K.

Tabla 2. Resultado del análisis de incertidumbre

8. CONCLUSIONES

Se presenta en este trabajo una síntesis del modelo de cálculo para estimar las pérdidas de calor a través de una ventana. Adicionalmente el resultado del análisis experimental para diseño del banco de ensayos utilizado para la validación experimental del modelo, los sistemas de medición utilizados, tipos de mediciones implementadas y el resultado del análisis de incertidumbre que permitirá estimar la incertidumbre total en los resultados de la validación.

El análisis de incertidumbre indica que la variable con mayor incertidumbre es la medición de la temperatura del aire y las superficies de la cámara, esto es bastante significativo si se considera que estas variables deben ser comparadas directamente con los resultados del modelo durante su etapa de validación.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Fonseca. "Estudio experimental del balance térmico de una ventana," Tesis de Maestría, Universidad de Concepción Chile, 2002.
- [2] C. Saavedra, A. Fissore, J. Mottard. "Diseño de un banco de ensayos para la validación de un modelo de diseño térmico de ventanas," Congreso de ar condicionado, refrigeracao aquecimento e ventilacao do mercosul, Brasil, Mercofrio 2000.
- [3] A. Fissore. "Simulación térmica detallada de una ventana," Congreso de ar condicionado, refrigeracao aquecimento e ventilacao do mercosul, Brasil, Mercofrio 2000.
- [4] Arasthet, Hartmann. "Experimental verification of a model of heat transfer through window", ASHRAE Trans. Vol .93 part 2, pp 755-765. 1987.
- [5] F. Dubros, S. Harrisons. "Comparison of experimental test result and analytical calculation of window thermal performance", ASHRAE Trans. Vol .95 part 2, pp 747-754. 1989.
- [6] M. Grasso, "Precision analysis of guarded hot plate window system used to measure heat transfer through window", ASHRAE Trans. Vol .90 part 1, pp 92-103. 1984.
- [7] K. Lomas, H. Eppel C. Martin, D. Bloomfield, "Empirical validation of thermal building simulation programs using test room data", Volumen 1: Final report International Energy Conservation in Building and Community Systems Annex 21C, IEA21RR6/94. Building Research Establishment. Watfor, U.K. 1994.
- [8] G. Guyon., E. Palomo. "Validation of two french building programs, part 1 -2 ", ASHRAE Trans. Vol .105 part 2, pp 695-735. 1999.
- [9] I. Beausoleil, P. Strachan. "On the significance of modeling internal surface convection in dynamic whole-building simulation programs", ASHRAE Trans. Vol .105 part 2, pp 929-940. 1999.