

# MERCOFRIO 2000-CONGRESO DE AIRE ACONDICIONADO, REFRIGERACION, CALEFACCION Y VENTILACION DEL MERCOSUR.

## DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA LA VALIDACION DE UN MODELO DE DISEÑO TERMICO DE VENTANAS

**Dr. Claudio Saavedra. O.-** [clsaaved@udec.cl](mailto:clsaaved@udec.cl)

**Dr. Adelqui Fissore Sch. -** [afissore@udec.cl](mailto:afissore@udec.cl)

**Jean-Michel Mottard.**

Universidad de Concepción, Facultad De Ingeniería , Departamento De Ingeniería Mecánica  
Casilla 53-C, Concepción. Fono: 41 – 203546. Fax: 41-251142 ,Concepción, Chile

**RESUMEN.** *El artículo presenta el diseño de un banco de ensayo para validar un modelo de cálculo térmico de ventanas. El banco de ensayos simula el comportamiento térmico de una oficina con sólo una pared exterior donde está ubicada una ventana de vidrio simple. Para obtener relaciones de transferencia de calor similares a las del edificio real, la cámara se construyó con una pared exterior y una pared interior, la cual está rodeada por un espacio de aire el cual se mantiene a la misma temperatura que el interior de la cámara. La pared donde va instalada la ventana se diseñó de tal manera que se pueda cambiar fácilmente el tipo y tamaño de ésta. En el presente artículo se describe también las instrumentación y los métodos de medición para la radiación solar, calor por radiación infrarroja exterior, temperatura del aire interior y exterior, velocidad y dirección del viento, flujo y temperatura del aire de ventilación y temperatura de las paredes.*

**Palabras claves:** *Experimental, Validación, Modelo, Ventanas, Energía*

### 1. INTRODUCCION

Está bastante difundida la creencia de que una ventana produce siempre pérdidas netas de calor en invierno; es decir, que las ganancias por radiación solar son siempre menores a las pérdidas por diferencia de temperatura. Esto probablemente sea válido para la mayoría de los países del hemisferio norte donde se tienen inviernos muy fríos, pero no es tan evidente para la mayoría de los países del hemisferio sur, donde el invierno es mucho más templado.

Considerando lo anterior, sería muy útil poder analizar en detalle el problema del balance térmico de una ventana, ya que permitiría mediante una modificación al diseño arquitectónico, lograr una disminución en el consumo de energía, pero lo más importante, es que en ciertos casos, esto se lograría aumentando el tamaño de las ventanas.

Lamentablemente, si se utilizan los modelos actuales disponibles para el balance térmico de una ventana, los errores serían tan grandes que prácticamente haría imposible diseñar correctamente una ventana (Fissore 1997).

Las razones que hacen que los modelos que funcionan bien para el hemisferio norte, no sean aplicables a nuestro problema en particular son las siguientes:

La primera se refiere al tipo de aplicación; en nuestro caso, se requiere de resultados muy precisos, ya que son pequeñas diferencias las que indicarán si se debe aumentar o disminuir el tamaño de la ventana. Por lo que errores del 30% en el balance térmico de la ventana son ya inaceptables. En cambio, si el modelo se emplea para calcular el consumo de energía en

calefacción, un 50% de error produce un error del orden de 10% en el consumo de calefacción, lo cual todavía es aceptable.

La segunda razón se relaciona con el hecho de que en nuestra región las ventanas que se usan, tienen frecuentemente un vidrio simple, a diferencia de los países más fríos (de donde vienen generalmente los modelos) donde principalmente se utilizan ventanas con doble o triple vidrio. El hecho de usar vidrio simple, hace que el problema sea mucho más complejo, ya que en este caso la principal resistencia térmica de la ventana ya no será el espacio de aire entre los vidrios (problema que es bastante conocido), sino que la convección y radiación interior las cuales están muy simplificadas en la generalidad de los modelos.

Debido a lo anterior, se decidió crear un nuevo modelo matemático para poder calcular con una precisión razonable el balance térmico de una ventana de vidrio simple en inviernos de climas templados. Como el problema es bastante complejo, y requiere de una serie de simplificaciones, se hace imprescindible poder realizar una validación del modelo.

Existen varios tipos de validación que se hacen comúnmente a este tipo de programas (Bloomfield 1999, Judkoff 1999). Normalmente la primera validación se trata de un chequeo al código complementada con análisis de resultados de situaciones simples conocidas. Otro tipo de validación es mediante la comparación con resultados de otros programas similares (Guyon & Palomo 1999-1). Finalmente, existe la validación con mediciones experimentales (Guyon & Palomo 1999-2) ya sea a nivel de modelo a escala o en modelos complejos reales. La experiencia ha demostrado que se debe intentar realizar la validación más exhaustiva posible (Bloomfield 1999) si se desea tener una clara posibilidad de éxito. Luego, en nuestro caso se harán todos los tipos de validaciones antes mencionados, dentro de los cuales se encuentra una sólida validación experimental.

El objetivo de este artículo es dar a conocer como se diseñó el banco de ensayos donde se hacen las mediciones para la validación del programa computacional de balance térmico de una ventana.

## **2.- DISEÑO DEL BANCO DE ENSAYO**

Se decidió simular un recinto con una pared exterior, donde va instalada una ventana. El resto de las paredes, incluidos el piso y el techo, se encuentran rodeados por recintos acondicionados que están a la misma temperatura que el recinto en estudio. Para validar el modelo, el banco de ensayos debe ser lo más parecido al recinto real que se desea simular; sin embargo, se debe cuidar que las cantidades se puedan medir con la precisión adecuada.

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 es imposible de trabajarlo en escala reducida, por lo que debe y será tratado en escala natural (1:1). Según esto, la altura de la pared es 2.4 m.

### **2.1. Diseño de las paredes del banco de ensayos**

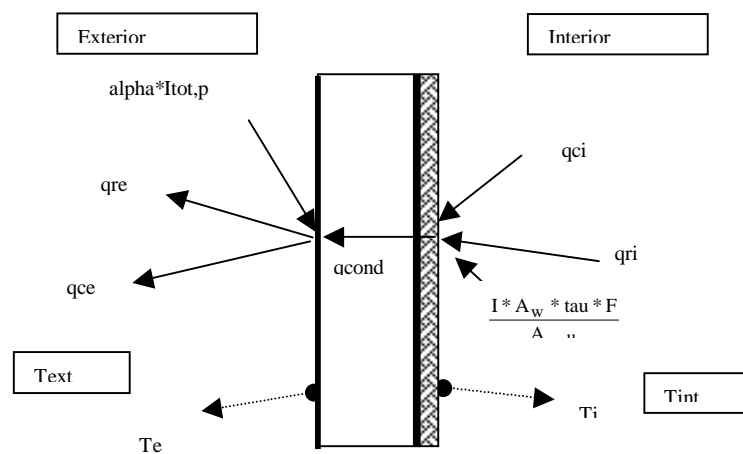
La pared frontal, donde está instalada la ventana y que corresponde a aquella del recinto que está en contacto con el exterior, se construye como una pared normal. Sin embargo como el énfasis se pone en el balance térmico de la ventana, es conveniente usar una pared con aislante térmico adecuado para que el intercambio de calor a través de la ventana sea significativamente mayor que a través de la pared, aumentando así la precisión en el balance de ésta. Por tal motivo se decidió utilizar una pared de madera con 5 cm de aislación.

Como el modelo considera el intercambio de calor recinto - exterior a través de una sola

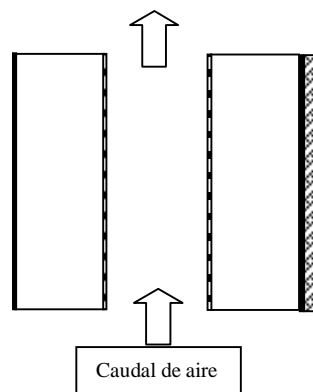
ventana y pared, en el diseño de la instalación de ensayos se debe minimizar el efecto de la radiación solar y de la transferencia de calor por las otras paredes (se consideran paredes interiores de un edificio). Para esto, se estudiaron dos alternativas constructivas, las que se describen a continuación.

La primera corresponde a una pared única, compuesta por un panel de poliestireno expandido de 20 cm de espesor que está recubierto en sus dos caras con planchas de acero galvanizado (ver Fig.1).

La segunda alternativa es una pared doble con un espacio ventilado con aire, y cuya temperatura es regulada de modo que sea constante y uniforme, igual a la del aire al interior de la cámara. El panel exterior está compuesto por una plancha de acero galvanizado, una capa de aislación de poliestireno expandido (10 cm de espesor) y una plancha de acero galvanizado. El panel interior está formado de igual forma, pero tiene además un revestimiento de madera de 12 mm de espesor en su cara interior (ver Fig.2).



**Figura 1 : Primera solución constructiva y flujos de calor asociados.**



**Figura 2 :Segunda solución , pared de doble panel ventilada**

Se realizó un análisis en régimen transiente del comportamiento térmico de las paredes (diferencias finitas), tomando en cuenta una situación invernal y una situación estival. Para la situación invernal, se ha considerado una evolución temporal de tipo senoidal para la temperatura del aire exterior, con un mínimo de 278K a las 5h y un máximo de 285K a las 14h. La radiación solar es nula entre las 18h y las 8h. y su valor máximo vale 950 W/m<sup>2</sup>. Se

ha considerado que el cielo tenía una temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  para calcular el flujo de calor hacia el cielo en infrarrojo. Se ha tomado una velocidad de aire exterior igual a  $1.5\text{ m/s}$  paralela a la pared.

Los resultados indican que las condiciones interiores del local quedan muy influenciadas por las exteriores cuando se usa una pared única como la descrita anteriormente. El flujo de calor para la situación de invierno que sale o entra por conducción a través de la placa de plumavit al nivel interior varía entre  $-1$  y  $1\text{ W/m}^2$  (positivo cuando sale del recinto). En cambio, para la pared doble, éste se reduce a un valor que fluctúa entre  $0.2$  y  $1\text{ W/m}^2$ . Por lo tanto se decidió utilizar la opción de doble pared con  $10\text{ cm}$  de aislación. La Fig.3 corresponde a una foto de la construcción de los paneles exteriores donde se muestra la instalación del aislante. La Fig. 4 muestra la solución constructiva utilizada para el banco de ensayo y la Fig.5 muestra sus vistas de elevación y de planta en corte

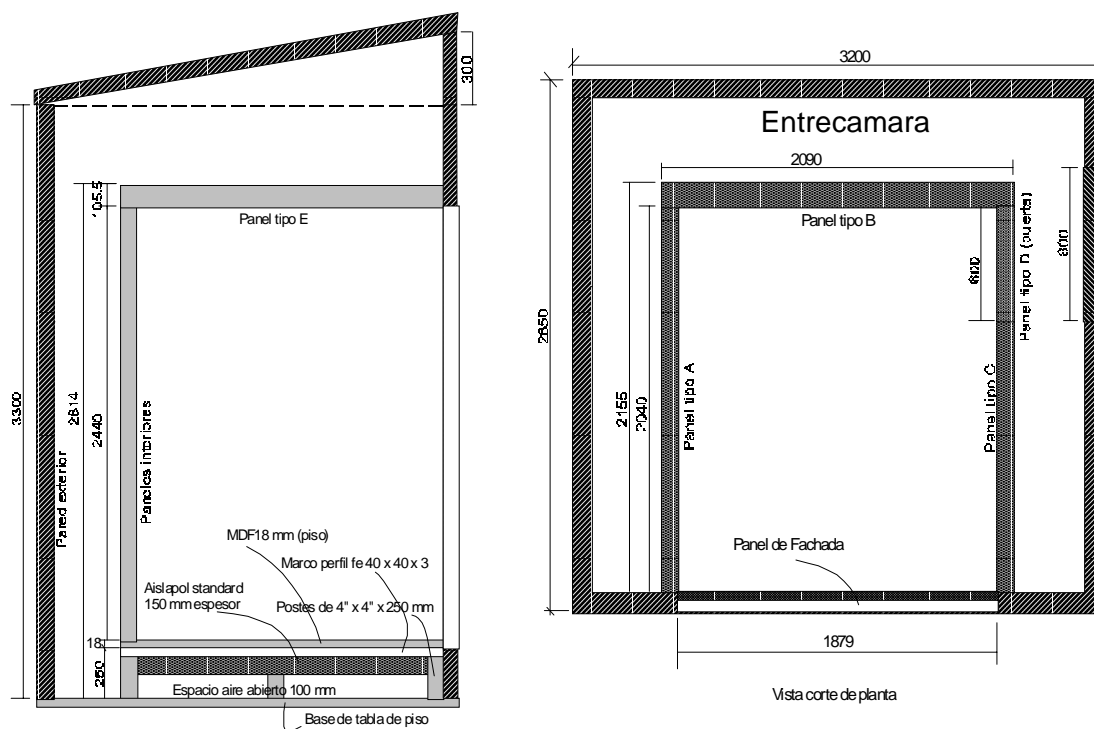


**Figura 3: Aislante en el panel exterior**



**Figura 4 : Cámara de ensayos instalada sobre edificio**

En el espacio que queda entre la cámara de ensayos y la cámara exterior se hace circular aire mediante ventiladores. Además se dispone de un sistema de control de temperatura (resistencia eléctrica + controlador) que se utiliza para mantener la temperatura de la entre cámara igual a la temperatura de la cámara de ensayos. Con esto se logra minimizar la pérdida de calor por las paredes interiores y además se obtiene un temperatura bien definida que se utilizará como variable de entrada para el modelo matemático.



**Figura 5: Vistas de elevación y planta en corte**

## 2.2 Definición de los ensayos a realizar

En el banco de ensayos se considera efectuar dos tipos de experiencias:

- Ensayos (tipo 1) con temperatura interior constante, para lo cual se variará el flujo de calor entregado al recinto. Con este tipo de experiencias se busca representar una situación invernal típica con calefacción controlada. En este tipo de ensayos se comparará el consumo de energía predicho por el modelo con el medido en la cámara.
- Ensayos (tipo 2) con temperatura interior variando libremente, lo que representan condiciones existentes en primavera y otoño cuando tanto el sistema de calefacción como el de aire acondicionado están desconectados. Aquí se compararán los valores medidos de las temperaturas del aire interior y superficiales de las paredes con los calculados con el modelo matemático.

La idea es realizar mediciones continuas durante un año. En este lapso de tiempo se variarán algunas condiciones del banco como: tipo y tamaño de ventana, tipo de pared exterior, capacidad térmica en el interior del recinto, tipo de elemento de protección interior, etc. De esta manera, los resultados serán representativos de una amplia gama de situaciones

típicas que se encuentran hoy en día en la construcción.

### **2.3. Definición de las mediciones a realizar**

El modelo matemático tiene como entradas la temperatura exterior, la radiación solar sobre una superficie horizontal o sobre la superficie de la ventana y la velocidad y dirección del viento. Las salidas del modelo son: el consumo de energía (o la temperatura del aire cuando el sistema esta fuera del control de la calefacción) y la temperatura interior de las paredes del recinto. Finalmente, los parámetros del modelo son la geometría tanto del recinto como del entorno y los materiales utilizados en la construcción. Luego serán estas las principales variables a medir. También se medirán otras que aunque no servirán para validar directamente el modelo, se utilizarán para analizar los resultados en caso de que las diferencias entre el modelo y las mediciones sean apreciables.

Las mediciones que se deben realizar se pueden clasificar en tres categorías : medición de condiciones límites, mediciones de comparación y mediciones de verificación. Las Mediciones de condiciones límites corresponden las condiciones de borde o variable de entrada que tendrá el modelo matemático durante su proceso de validación experimental. Las mediciones de comparación se realizan para la validación propiamente tal, ya que serán estas las variables que se utilizaran para comparar el modelo con las mediciones. Finalmente, las mediciones de verificación sirven para determinar de donde viene las posibles diferencias entre los ensayos y la simulación, además se utilizarán para determinar cada uno de los componentes del balance de calor del recinto.

## **3.- DISEÑO Y SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACION**

En esta sección se especifican los instrumentos que se utilizarán para hacer las mediciones de las variables indicadas en la sección precedente. Los resultados serán enviados a dos tarjetas de adquisición de datos de 20 canales cada una y a dos data-logger.

### **3.1.- Medición de las condiciones límites**

**Radiación Solar.** Se medirá la radiación solar incidente sobre el plano de la ventana, variable que se ingresara como dato al modelo. Esta se medirá con un piranómetro Middleton EP08 el cual tiene un nivel de error menor que 5%.

**Temperatura Exterior.** Se medirá con una termocupla. Para evitar los efectos de la radiación solar, de la radiación de gran longitud de onda del ambiente exterior, de la lluvia y condensación de la humedad exterior se agregara un sistema de protección. Se hizo un análisis de diferentes tipos de pantallas protectoras. Se eligió una pantalla constituida por dos cilindros concéntricos de metal cromado, de 20 cm de longitud, de 4 cm de diámetro exterior para el más grande. Un ventilador permite aumentar la velocidad de aire. Bajo estas condiciones, se calculó que la diferencia de temperatura entre el aire y la sonda sería del orden de 0.02 K.

**Radiación infrarroja hacia el ambiente:** La radiación de gran longitud de onda entre la ventana y el ambiente se descompone en radiación hacia el suelo y hacia el cielo. Si bien la temperatura del suelo se puede medir, es difícil determinar la temperatura del cielo. Para un día nublado, la temperatura del cielo se puede aproximar por la temperatura del aire. Para un día despejado, se considera generalmente que la temperatura del cielo vale  $-40^{\circ}\text{C}$  o se utiliza un flujo de calor de  $100\text{W}/\text{m}^2$ . Este valor depende principalmente de la nubosidad.

La fig. 6 muestra un dispositivo diseñado para medir la radiación nocturna hacia el exterior. El principio de funcionamiento es el siguiente. Se tiene una placa de metal de color negro, una resistencia eléctrica, una placa de aislante y una pantalla radiativa bajo el aislante. Un controlador fija la potencia entregada a la resistencia eléctrica de tal manera que la temperatura de la placa sea igual a la del aire, para anular la convección entre la placa y el aire. Según esto, la potencia entregada a la resistencia se utiliza casi en su totalidad para compensar el calor perdido por la placa por radiación de gran longitud de onda. La pantalla radiativa sirve para proteger el aislante de la radiación de las otras superficies. Este ensayo se efectuara durante la noche para evitar la radiación solar. En las condiciones en que será utilizado ( $1^{\circ}\text{C}$  de error en control de temperatura) se estima que el error sobre la radiación infrarroja hacia el ambiente sería de aproximadamente 6%.

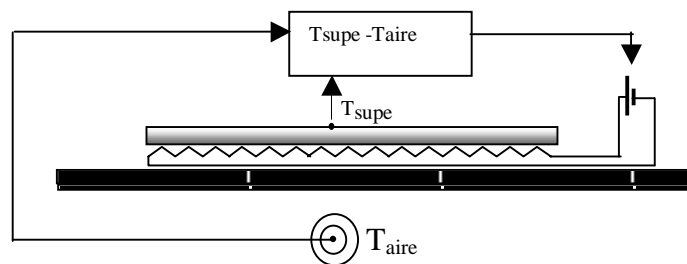


Figura 6. Instrumento para medir la radiación infrarroja nocturna

**Velocidad del Viento :** Se utilizará un anemómetro para medir la velocidad y dirección del viento. La precisión esperada es de  $0.3$  [m/s] para medir la velocidad y de  $3^{\circ}$  en la determinación de la dirección del viento.

**Temperatura de la entrecámara.** Para todas la paredes interiores se requiere minimizar el flujo de calor hacia fuera de la cámara interior. Esto se logra con una buena aislación de los paneles interiores y manteniendo la temperatura del aire intersticial igual a la temperatura del aire en el interior de la cámara. En todo caso, se medirá la temperatura de este aire y se utilizará como entrada al modelo de cálculo.

Como se tiene un circuito cerrado de circulación de aire en esta zona, con sólo medir la temperatura del aire en la extracción del recinto se obtiene una aproximación de la temperatura media en esta zona. Esta medición se hará mediante una termocupla sin protección.

**Temperatura superficial interior de las paredes exteriores.** Se utilizaran termocuplas puestas en paralelo. Se consideran 5 termocuplas por cada pared. Se tomaran las temperaturas de las 5 paredes.

La velocidad del aire no se medirá porque el coeficiente convectivo del aire influye poco en la resistencia térmica global de la pared, ya que la mayor parte de la resistencia (aproximadamente 90%) estará dada por la resistencia de los 10 cm de aislante.

**Flujo de aire de Infiltraciones.** La verdad es que este flujo se podría calcular mediante algún modelo dentro del programa de simulación, pero dado que los modelos de cálculo entregan resultados con un error bastante grande (Klems.1992), se decidió no calcularlo, sino que medirlo. Para esto se inyecta aire mediante un ventilador para simular las infiltraciones. Como la impulsión de aire provoca que toda la cámara quede en sobrepresión se evitará que el

aire ingrese por las rendijas de la construcción (en realidad el aire sale por las rendijas). Luego, sólo se deberá medir el caudal de aire inyectado por el ventilador para conocer las infiltraciones. El caudal se determina midiendo la presión dinámica y estática a la salida de la tobera.

### 3.2. Mediciones de comparación

**Potencia calorífica.** Para obtener la potencia calorífica necesaria para mantener una temperatura constante en el recinto, se usarán cintas calefactoras eléctricas puestas sobre el suelo. Esta manera de hacerlo produce una muy pequeña estratificación en el recinto, lo cual es bueno para el análisis de los resultados.

El control de la calefacción será "ON-OFF". Como la potencia disipada es fija, para medir la potencia, se medirá el tiempo durante el cual está cerrado el relé que es comandado por un controlador que mantiene la temperatura interior en un nivel prefijado.

**Temperatura del Aire Interior.** Esta medición podría ser influenciada por la radiación de las paredes interiores y la radiación solar que entra por la ventana, por lo cual se deben tomar medidas de precaución.

Para verificar la posible estratificación se usarán 3 termocuplas con doble pantalla protectora de acero cromado. Estas termocuplas serán puestas cerca del piso, al centro de la pieza y cerca del techo. Estas sondas serán aspiradas aunque el flujo a manejar será mucho menor que el que se maneja para medir la temperatura exterior.

**Temperatura superficial interior de las paredes interiores.** Esta temperatura se medirá con termocuplas repartidas uniformemente en las paredes. También se utilizará el concepto de termocuplas en serie para obtener los promedios. Para comparar los resultados del banco y del modelo, se tendrá algunos problemas porque el modelo toma en cuenta una sola temperatura de superficie para toda la pared. Es decir que si hay radiación solar en sólo una parte de la pared, el modelo la reparte sobre toda la superficie de la pared considerada. Luego, aunque se tomen temperaturas medias, estas podrían ser no muy representativas.

### 3.3. Mediciones de verificación

**Temperatura del aire en la entrecamara en diferentes puntos.** Se medirán alrededor de 5 puntos. Esta variable se usa como complemento a la medición de la succión de aire, de tal manera de conocer cual es la posible no uniformidad de la temperatura del aire en esta zona.

**Radiación solar en plano horizontal.** Esto se hace mediante un piranómetro de radiación global. Esta medición es un complemento a la medición de la radiación en el plano de la ventana.

**Temperaturas de la superficie interior de las paredes interiores.** Se medirán en diferentes puntos (alrededor de 8) y servirá para complementar la información de las temperaturas promedios, en el sentido de poder detectar condiciones fuertes de no uniformidad en las condiciones.

**Temperatura del vidrio.** La medición de la temperatura del vidrio mediante el uso de



una termocupla es complicada (Liu 1988) porque el sensor no tiene la misma absorptividad solar que el vidrio. En nuestro caso se medirá con una termocupla lo mas fina posible. En realidad esta variable debería haber sido una medición de comparación, pero dada la dificultad de su medida solo se utilizará como control.

**Flujo de calor por conducción a través de la pared que contiene la ventana.** Para esta medición se construirá un sensor de flujo de calor como el que se muestra en la Fig.7. El principio de medición se basa en obtener una diferencia de temperatura entre 2 caras de un material que se adhiere a la pared. Para que el material en cuestión no perturbe demasiado las condiciones de la pared, este debe ser de relativamente alta conductividad. Por esta razón se espera tener una muy pequeña diferencia de temperaturas. Para poder medir esta diferencia de temperaturas muy pequeñas se instalan una gran cantidad de termocuplas en serie con lo cual se multiplica la señal de salida. En el presente caso se utilizo una tarjeta de circuito impreso como material de base. El mismo circuito impreso sirve para ir fabricando las termocuplas de cobre constatan conectadas en serie tal como se muestra en la figura.

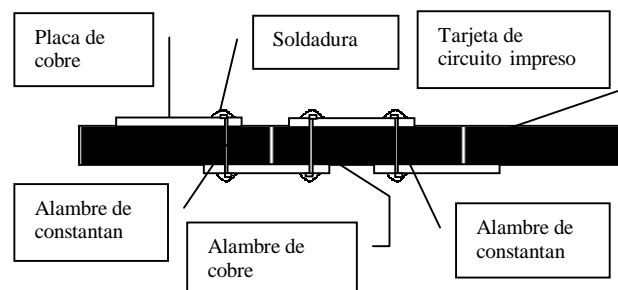


Figura 7 : Sensor de flujo de calor.

Para lograr medir un flujo de calor de entre 2 a 30  $W/m^2$  y con un 6% de precisión, se calculó que serían necesarias alrededor de 500 termocuplas. Una vez construido el aparato, se debe calibrar para obtener la relación entre voltaje medido y flujo de calor. Existen métodos de calibración muy simple que aseguran un nivel de error del orden de 2.5% en la calibración.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha constado que si se desea construir un banco de ensayo para realizar mediciones precisas del balance térmico de una ventana expuesta al clima real, se debe ser muy cuidadoso con el diseño de éste, ya que de otra manera los errores podrían ser tan altos que haga inútil todo el trabajo de medición. En varias ocasiones se decidió imponer condiciones que no son muy reales, con la finalidad de mantener los errores de mediciones dentro de valores razonables, como es el caso de la ventilación forzada, la forma de calefacción y otras.

Para este tipo de mediciones (convección y radiación del mismo orden de magnitud) es imprescindible trabajar en escala 1:1, al menos en la altura interna del recinto.

Se debe poner especial cuidado en las pérdidas por las paredes ya que debido a su gran superficie podrían tener un efecto muy importante en los resultados del balance. Debido a esto se utilizó el concepto del anillo de guarda, lo que implica utilizar doble pared con control de la temperatura en el espacio de aire.

Otro aspecto muy importante es la correcta medición de la temperatura del aire tanto interior como exterior. Para esto se debió recurrir a una sonda de medición aspirada con doble

pantalla protectora para la radiación.

Tomando en cuenta todo lo anterior se piensa que con el diseño logrado se podrán realizar mediciones que podrán aportar directrices muy importantes para el mejoramiento de los modelos de balance térmico de edificios.

### ***Agradecimientos***

Los autores agradecen al CONICYT Chile por haber financiado el presente trabajo mediante el proyecto fondecyt : Modelo para el diseño óptimo de ventanas en la construcción.

Los autores también agradecen a los alumnos de Ingeniería Mecánica y del programa de Magíster en Ingeniería Mecánica Srtas: Paola Frias y Carolina Fuente-Alba y a los Srs: Luis Muñoz, Nestor Fonseca, Jean Michel Mottard, Andres Ortiz, Marcos Saenz, Jaime Inzunza, Felipe trebilcock, Alvaro Hillerns y Claudio Solis por haber participado en el diseño del banco de ensayo en el marco del curso de Teoría de Mediciones del programa de Magíster en Ingeniería Mecánica y en el marco de un Proyecto de ingeniería Mecánica.

### **REFERENCIAS**

- Bloomfield D.P., 1999, An overview of validation methods for environmental software. ASHRAE Transactions Vol. 105 Part 2, pp. 685 - 693.
- Fissore Adelqui 1997 Effect of internal long wave radiation and convection on fenestration simulation. CLIMA 2000 Congress. Brussels.
- Guyon G., Palomo E. 1999-1, Validation of two French building energy programs, Part 1: Analytical verification, ASHRAE Trans. Vol. 105 Part 2.
- Guyon G., Palomo E. 1999-2, Validation of two French building energy programs, Part 2: Parameter estimation method applied to empirical validation, ASHRAE Trans. Vol. 105 Part 2.
- Judkoff, R.D., Neymark, J.S., 1999, Adaptation of the BESTEST intermodel comparison method for proposed ASHRAE Standard 140P: method of test for building energy simulation. ASHRAE Trans. Vol. 105 Part 2.
- Liu. 1988. "Temperature measurement of glass subjected to solar radiation". ASHRAE Transactions Vol. 94 Part 2 p 1350.

### **DESIGN OF A TEST-BENCH TO VALIDATE A MODEL OF A THERMAL WINDOW DESIGN**

*Paper presents the design of a test-bench and instrumentation to validate a window thermal mathematical model. The test-bench simulate the thermal performance of a office with a only one wall in directly contact with outdoors, where a single glass window is mounted. To obtain a similar heat transfer relation as the real building, the chamber has been designed and manufactured with an inner and an outer envelope, and with an air spacing maintaining at the same temperature that the test chamber. To change the window size, the test-bench is equipped with a single modifiable outer wall. Instrumentation and methods of measurement for solar radiation, infra red outdoor radiation, indoor and outdoor air temperatures, wind velocity, heat transfer, air ventilating flow and temperature, wall temperatures, etc. are specified.*

**key – words** : *Experimental, validation, model, windows, energy.*