

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Mecánica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Determinación de la Capacitancia Térmica de un Vidriado Mediante
un Método en Estado Transitorio**

presentada por

Ing. Jonatan Giuseppe Meza Flores

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias de Ingeniería Mecánica

Director de tesis
Dr. José Jassón Flores Prieto

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Cuernavaca, mor., 12 mayo 2015

OFICIO No. DIM/054/2015
Asunto: Aceptación de documento de tesis

C. DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Ing. Jonatan Giuseppe Meza Flores, con número de control M13CE020, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "**Determinación de la capacitancia térmica de un vidrioado mediante un método en estado transitorio**" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



DR. JOSÉ TASSÓN FLORES PRIETO
Doctor en Ingeniería
4355408

REVISOR 1



DR. JESÚS ARCE LANDA
Doctor en Ingeniería
6170951

REVISOR 2



DRA. GABRIELA DEL SOCORRO ÁLVAREZ G.
Doctora en Ingeniería
2105850

REVISOR 3



DR. EFRAÍN SIMÁ MOO
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica
6601954

C.p. (Lic. Guadalupe Garrido Rivera). - Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Estudiante
Expediente

Iniciales AAP/mrsr

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Cuernavaca, Mor., 20 de mayo de 2015
OFICIO No. SAC/118/2015

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ING. JONATAN GIUSEPPE MEZA FLORES
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "**Determinación de la capacitancia térmica de un vidrioado mediante un método en estado transitorio**", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO"

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



CENTRO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr



Dedicatorias

Esta tesis y todos mis logros académicos se los dedico con mucho cariño a mis padres. Desde que inicie mi formación académica me han apoyado con todo lo necesario y aún en la distancia no me he sentido lejos.

¡Papás esto es para ustedes!

Gracias por nunca dejarme sufrir.

Agradecimientos

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por la oportunidad de continuar mi formación académica, especialmente a las facilidades prestadas en el Laboratorio de Tecnología Solar para el desarrollo de este proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo al proporcionarme una beca a lo largo de mis estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica.

A los miembros de mi comité de maestría, Dra. Gabriel del Socorro Álvarez García, Dr. Efraín Simá Moo, Dr. Jesús Arce Landa, gracias por sus comentarios y críticas que sirvieron para mejorar la calidad de mi trabajo.

A todos mis profesores por sus enseñanzas y su influencia en mi desarrollo académico.

Al departamento de servicios escolares en especial a la Lic. Guadalupe Garrido y a Ana Pérez por su tan amable atención durante mi estancia en esta institución.

Al Dr. José Jassón Flores Prieto por su dirección y consejos que me ayudaron a superar traumas y a corregir el camino en el momento oportuno.

Al Dr. Edgar Melo y a la Dra. Karla Aguilar por su apoyo técnico y amistad durante nuestra estancia en esta institución.

Al Dr. Jesús Xamán por sus consejos y apoyo.

A Iván Hernández por la traducción del resumen de esta tesis.

A Rocío Salazar por su apoyo en todos los trámites necesarios en mi estancia en esta institución.

Al Dr. Abúndez Pliego por su apoyo en la impresión de los tomos de revisión.

A mis compañeros por hacer mi estancia agradable y llenarla de momentos divertidos.

Un agradecimiento especial a mi novia Janeth Villalobos por amarme, comprenderme, apoyarme y sobre todo soportarme durante este tan peculiar episodio de nuestra vida.

Índice

	Pág.
Lista de Figuras.	iv
Lista de Tablas.	vi
Nomenclatura.	vii
Resumen.	x
Abstract.	xii
CAPÍTULO 1. Introducción.	
1.1 Generalidades.	2
1.2 Revisión bibliográfica.	3
1.2.1 Métodos de prueba.	3
1.2.2 Modelado dinámico de sistemas.	10
1.3 Conclusión de la revisión bibliográfica.	16
1.4 Objetivos y alcances.	17
1.4.1 Objetivo general.	17
1.4.2 Objetivos específicos.	17
1.4.3 Alcances.	18
1.5 Estructura de la tesis.	18
CAPÍTULO 2. Modelado teórico.	
2.1 Marco teórico.	20
2.1.1 Mecanismos de transferencia de calor.	20

2.1.2 Analogía entre sistemas térmicos y sistemas eléctricos.	23
2.1.3 Funciones de transferencia.	25
2.2 Modelo físico.	26
2.3 Modelo matemático (<i>Modelo 1</i>).	29
2.3.1 Ecuaciones del circuito RC del sistema.	29
2.3.2 Funciones de transferencia del sistema.	31
2.3.2.1 Modelo en tiempo continuo (transformada de Laplace).	31
2.3.2.2 Modelo en tiempo discreto (transformada Z).	33
2.3.3 Identificación de la capacitancia térmica.	34
2.4 Modelo matemático (<i>Modelo 2</i>).	36
2.4.1 Ecuaciones del circuito RC de la componente.	36
2.4.2 Funciones de transferencia de la componente.	37
2.4.3 Identificación de la capacitancia térmica.	38
 CAPÍTULO 3. Diseño experimental.	
3.1 Estrategia experimental.	41
3.1.1 <i>Modelo 1</i> : Análisis al nivel del sistema.	41
3.1.2 <i>Modelo 2</i> : Análisis al nivel de la componente.	43
3.1.3 Muestra de referencia.	43
3.1.4 Plataforma de identificación.	44
3.2 Equipo experimental.	45
3.2.1 Calorímetro.	46
3.2.2 Estación meteorológica.	46
3.3 Verificación de la funcionalidad de la <i>plataforma de identificación</i>	48

3.3.1 Funcionalidad del <i>Modelo 1</i>	48
3.3.2 Funcionalidad del <i>Modelo 2</i>	52
 CAPÍTULO 4. Resultados.	
4.1 Identificaciones con el análisis a nivel del sistema.	55
4.1.1 <i>Modelo 1</i> : relación de masividad calorímetro-muestra alta.	55
4.1.2 <i>Modelo 1</i> : relación de masividad calorímetro-muestra reducida.	58
4.2 Identificaciones con el análisis a nivel de la componente.	60
4.2.1 Condiciones de prueba.	60
4.2.2 Funciones de transferencia.	61
4.2.3 Identificación de la capacitancia térmica.	62
4.2.4 Comparación con trabajos previos.	63
 CAPÍTULO 5. Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.	
5.1 Conclusiones.	67
5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.	68
 Bibliografía.	 69
 Apéndice: Ajuste de parámetros.	 72

Lista de Figuras

Figura	Descripción	Página
2.1	Temperaturas en una pared sólida.	20
2.2	Perfiles de velocidad y temperatura sobre una superficie.	21
2.3	Cargas térmicas de radiación.	22
2.4	Modelo Físico.	27
2.5	Circuito RC del sistema (<i>Modelo 1</i>).	28
2.6	Circuito RC de la componente (<i>Modelo 2</i>).	29
2.7	Circuito RC del sistema simplificado (<i>Modelo 1</i>).	30
2.8	Circuitos equivalentes del <i>Modelo 2</i> , a) influencia exterior, b) influencia interior.	36
3.1	Diagrama de flujo de la <i>plataforma de identificación</i> .	45
3.2	Equipo experimental.	46
3.3	Vista frontal del calorímetro.	47
3.4	Caja isotérmica.	48
3.5	Comportamiento hipotético de G_{pc} y T_e .	50
3.6	Comportamiento de T_{sa} y $T_{i\ ext}$.	50
3.7	Temperaturas en el <i>Caso 1</i> .	51
3.8	Temperaturas en el <i>Caso 2</i> .	51
3.9	Temperaturas superficiales del vidriado.	53
3.10	Flujo de calor a través de la componente.	54
4.1	Condiciones ambientales durante la prueba.	56
4.2	Flujos de calor al interior (—). Contribuciones de la incertidumbre en los flujos de calor (- - -).	57

4.3	Comportamiento de T_i experimental y T_i simulada.	58
4.4	Comparativo de T_i 's simuladas con diferentes C_v 's.	59
4.5	Condiciones ambientales durante la prueba.	60
4.6	Comportamiento de T_i experimental y T_i simulada.	61
4.7	Temperaturas y flujo de calor en la componente vidriada durante la prueba.	62
4.8	Flujo de calor en la componente vidriada por períodos.	63
4.9	Comparativo del C_p .	65

Lista de Tablas

Tabla	Descripción	Página
2.1	Equivalencias de circuitos.	22
3.1	Propiedades del vidriado de referencia.	44
3.2	Parámetros de los materiales supuestos al interior del calorímetro.	49
3.3	Resistencias y Capacitancias (<i>Modelo 1</i>).	49
3.4	Identificación de C_v (<i>Modelo 1</i>).	52
3.5	Resistencias y capacitancias (<i>Modelo 2</i>).	53
4.1	Resistencias, Capacitancias y $CFT'S$ (<i>Modelo 2</i>).	62
4.2	Identificaciones de C_v (<i>Modelo 2</i>).	64

Nomenclatura

Variables	Descripción	Unidades
A	Área.	m^2
C_p	Calor específico.	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$
C_i	Capacitancia térmica equivalente al interior del sistema.	$\text{kJ}/^\circ\text{C}$
C_v	Capacitancia térmica equivalente del vidriado.	$\text{kJ}/^\circ\text{C}$
C_{vI}	Capacitancia térmica equivalente del vidriado identificada.	$\text{kJ}/^\circ\text{C}$
C_{vT}	Capacitancia térmica equivalente del vidriado teórica.	$\text{kJ}/^\circ\text{C}$
CFT	Coefficiente de función de transferencia.	Variable
E	Tensión eléctrica.	V
e_i	Excitación al interior del sistema.	W
G	Irradiancia solar.	W/m^2
h	Coefficiente de transferencia de calor.	$\text{W}/m^2^\circ\text{C}$
I	Corriente eléctrica.	A
L	Espesor.	m
N	Fracción.	Adimensional
P	Periodo de muestreo.	s
q	Flujo de calor por unidad de área.	W/m^2
Q	Flujo de calor.	W
R	Resistencia térmica.	$m^2^\circ\text{C}/\text{W}$
t	Tiempo.	s
T	Temperatura.	$^\circ\text{C}$
V	Volumen.	m^3
Símbolos		
ρ	Reflectancia solar.	Adimensional
α	Absortancia solar.	Adimensional
ε	Emitancia.	Adimensional
λ	Conductividad térmica.	$\text{W}/m^\circ\text{C}$

τ	Transmitancia solar.	Adimensional
σ	Constante de Stefan-Boltzmann.	$\text{W/m}^2\text{K}^4$
δ_T	Desviación entre valores de temperaturas.	$^{\circ}\text{C}$
δ_C	Desviación entre valores de capacitancias.	%
δq	Desviación entre valores de flujos de calor.	W

Subíndice

a	Absorbido.
$alrd$	Alrededores.
b	Debido a la bomba.
ce	Convectivo exterior.
ci	Convectivo interior.
cr	Convectivo radiativo.
e	Exterior.
es	Exterior superficial.
f	Debido al ventilador.
i	Interior.
is	Inerior superficial.
m	Media inicial.
$M1$	Coefficiente del Modelo 1.
$M2$	Coefficiente del Modelo 2.
pc	Plano del calorímetro.
pl	A través de paredes laterales.
pm	A través del panel de montura.
pp	A través de la pared posterior.
r	Removido.
re	Radiativo exterior.
ri	Radiativo interior.
$real$	Variable que se conoce de manera experimental.

<i>s</i>	A través de los soportes.
<i>sa</i>	Sol- aire.
<i>sim</i>	Variable reproducida con la plataforma de identificación.
<i>v</i>	A través del vidrio.
<i>ve</i>	A través del vidrio hacia el exterior.
<i>vi</i>	A través del vidrio hacia el interior.

Resumen

En este documento se presentan el proyecto de investigación titulado, “*Determinación de la capacitancia térmica de vidriados mediante un método en estado transitorio*”. Se desarrolló una metodología para la determinación de la capacitancia térmica de vidriados considerando circuitos de resistencia capacitancia (RC) y sus funciones de transferencia. Dos modelos fueron desarrollados y analizados, el *Modelo 1* a un nivel del sistema que involucró a la componente vidriada y su interacción con el exterior e interior del sistema y el *Modelo 2* a nivel de la componente que únicamente involucró a la componente vidriada. Los modelos se resolvieron con una plataforma de identificación de parámetros codificada en Matlab[®], la cual utilizó datos tomados de un calorímetro solar, el cual fue reportado por Macías-Melo (2013). La *plataforma de identificación* engloba la formulación de las funciones de transferencia, la simulación de datos de entrada y salida, la identificación de los coeficientes de función de transferencia y la identificación de la capacitancia térmica equivalente del vidrio.

La verificación de la funcionalidad de la *plataforma de identificación* de parámetros se realizó identificando la capacitancia térmica con ambos modelos, a partir de datos hipotéticos del comportamiento de la radiación, la temperatura exterior, la temperatura interior, y del flujo de calor a través de la componente vidriada. Para los dos modelos, no hubo desviación en la identificación de la capacitancia térmica con respecto a los valores propuestos, mostrando buena funcionalidad.

Una vez verificada la funcionalidad de la *plataforma de identificación*, se realizaron los análisis a nivel del sistema (*Modelo 1*) y a nivel de la componente (*Modelo 2*) a partir de las funciones de transferencia correspondientes. Con el *Modelo 1*, la temperatura interior se reprodujo con una máxima desviación promedio de 0.27, mientras que la capacitancia térmica se identificó con valores de 1.68 y de 3.44 kJ/°C con desviaciones del 85% y 69%, respectivamente, con relación al valor de referencia (11.25 kJ/°C). De los resultados de este análisis se observó que el modelo generado, permite identificar a la capacitancia térmica con una desviación mínima del 69%.

Con el *Modelo 2*, se lograron reproducciones del flujo de calor a través de la componente con un error medio máximo de 0.006 W y se identificó a la capacitancia térmica con un valor promedio de 11.02 kJ/°C con una desviación máxima de 4.3% con relación al valor de referencia. El C_p se determinó considerando las capacitancias identificadas con un valor promedio de 0.73 kJ/kg°C con una desviación de 2.08% con relación al C_p de referencia (0.75 kJ/kg°C). El valor del C_p determinado está dentro del intervalo de 0.70 a 0.80 kJ/kg°C, lo que concuerda con lo reportado en la literatura. Se puede observar que el *Modelo 2* permite realizar identificaciones del C_p y la conductividad térmica de vidriados con una desviación del 2.08% y 0.3%, respectivamente.

Abstract

This work presents the project entitled "*Determination of the thermal capacitance of glazings by a method in transient state*". A transient state methodology to determining the thermal capacitance of glazings was carried out taking in to account RC circuits, which were solved in terms of transfer functions. A pair of models was developed and analyzed, the *Model 1* at system level and the *Model 2* at component level. The models were solved by an identification parameters platform codified in Matlab[®], which this used data taken form a solar calorimeter as reported by Macías-Melo (2013). The *identification platform* includes the formulation of transfer functions, the simulation of input and output data, the identification of the coefficients of transfer function and the identification of the thermal equivalent capacitance.

The functionality of the *identification platform* was verified identifying the thermal capacitance by both using hypothetical data of solar irradiance, outdoor temperature and interior temperature, and using the heat flow through the glazing sample. The deviation of the identified thermal capacitance beside the proposed was 0.0% for the both test, showing good functionality.

After functionality of the *identification platform* was verified, an analysis at the system level (*Model 1*) and component level (*Model 2*) from the corresponding transfer functions were performed. According to *Model 1*, the interior temperature was achieved with maximum deviation of 0.27°C, while the thermal capacitance was 1.68 and 3.44 kJ/°C, with deviations of relative reference value (11.25 kJ/°C), of 85% and 69%, respectively. As seen, the proposed model identifies the thermal capacitance with a minimal deviation of 69%.

According to *Model 2*, the heat flow was reproduced with a maximum average deviation of 0.006 W. For this case, the thermal capacitance was 11.02 kJ/°C with a maximum deviation of 4.3% whit respect to the reference value. Taking in to account the identified thermal capacitance, the glazing C_p was 0.73 kJ/kg°C on average with a deviation of 2.08% whit respect to the reference value (0.75 kJ/kg°C). The value of the determinate C_p was within the

range of 0.70 to 0.80 kJ/kg°C, which is according with those reported in the literature. It can be seen that *Model 2* allows the identification of the C_p and thermal conductivity of single glazings with a deviation of 2.08% and 0.3 %, respectively.

Capítulo 1

Introducción.

En este capítulo se presentan las generalidades y el estado del arte de la identificación de parámetros en sistemas vidriados. En el estado del arte se enfatiza sobre los métodos que se han venido empleando para la caracterización de envolventes de edificaciones y los modelos en estado transitorio. También, se presentan los objetivos, alcances y una descripción de la estructura de esta tesis.

1.1 Generalidades.

En la escala mundial, el uso del vidrio plano se ha venido incrementando en el diseño arquitectónico, principalmente en las grandes edificaciones, debido a su gran impacto estético y lumínico, embargando así la eficiencia térmica. La sustentabilidad energética y ambiental han impulsado un considerable crecimiento de la demanda de sistemas vidriados con valor agregado, ya que estos vidriados permiten la iluminación y los diseños arquitectónicos actuales sin comprometer considerablemente la eficiencia térmica de las edificaciones, [Market wired, 2008]. Con esto, la creciente demanda de vidrios con valor agregado ha conducido a la implementación de certificaciones y regulaciones en el mercado de estos productos, en busca de establecer un mercado cada vez más estable y con mayor certidumbre. Las acciones de certificación y normalización se han realizado con mayor énfasis en Europa, Estados Unidos y Australia, donde generalmente se basan en normas emitidas por ISO y ASTM. En México, hasta el momento solo se cuenta con normas como la NOM-008-ENER-2001, la NOM-018-ENER-1997, la NOM-020-ENER-2012, la NOM-024-ENER-2012 y el proyecto de sello FIDE para ventanas térmicas, que han venido fomentando el buen uso de los vidriados en las edificaciones.

En la escala global actualmente, las normas que impulsan la eficiencia energética de sistemas vidriados consideran como figuras de mérito al coeficiente global de transferencia térmica U , y al coeficiente de ganancia de calor solar $CGCS$, que corresponden a modelos en estado permanente. En la mayoría de los trabajos reportados se ha encontrado que las estimaciones de estos parámetros térmicos se han venido realizando aplicando metodologías en estado permanente, las cuales para fines comparativos en la escala comercial han sido adecuados [ISO 8990 (1994), ISO 10292 (1994), ASTM C-1114 (2000), NOM-008-ENER (2001), ASHRAE (2005), ASTM C-1363 (2005), NFRC 201 (2010)]. Sin embargo, en los últimos años, ha habido un interés creciente en el análisis de las componentes de edificaciones en estado transitorio, ya que permiten simulaciones del desempeño térmico de la edificación con menor incertidumbre, y ha dado lugar a una mejor optimización de sistemas novedosos para climatización, además de que los tiempos de prueba pueden reducirse considerablemente, [Baker y Van Dijk (2008)]. Por otro lado, normas como la ISO 13786-07, también consideran

características térmicas para modelos en estado transitorio, como lo son la difusividad térmica, el tiempo de retraso, el factor de amortiguamiento y la capacitancia térmica, los cuales están definidos en términos de la frecuencia y la amplitud de la temperatura (comportamiento sinusoidal).

Con lo anterior se ha observado una creciente demanda de parámetros característicos para modelos transitorios de sistemas vidriados, y consecuentemente de trabajos enfocados a modelos dinámicos para la caracterización de sistemas vidriados que están siendo desarrollados en la actualidad. En este sentido, la capacitancia térmica del vidrio es un parámetro característico que juega un rol importante en el tratamiento dinámico de los problemas de transferencia de calor, y aún no se ha establecido una metodología para su determinación mediante un análisis dinámico. La capacitancia térmica de los materiales se viene calculando a partir de la densidad ρ , y el calor específico C_p , [Asan y Sancaktar (1998) y Asan (2006)]. Actualmente, el C_p se calcula por calorimetría diferencial de barrido (en estado permanente) como reporta ISO 11357-04. Además, Gill P. S. *et. all* (2010) afirman en su trabajo que la calorimetría es el único método para la determinación directa de la entalpía asociada con la determinación del C_p .

1.2 Revisión bibliográfica.

La bibliografía revisada comprende estudios sobre métodos de prueba, modelación dinámica de sistemas y estudios sobre identificación de parámetros.

1.2.1 Métodos de pruebas.

ISO 8990 (1994) establece los procedimientos y requerimientos para determinar las propiedades de transmisión térmica en estado permanente de componentes de construcción (no incluye ventanas), mediante la utilización de *Hot Box* con guarda calibrada, también establece los requerimientos y procedimientos para calibrar el aparato de prueba. En esta norma se incluyen dos métodos para realizar estas mediciones: el método de *Hot Box* calibrada y el método de *Hot Box* con guarda. En el caso de *Hot Box* con guarda, la caja climática está rodeada por una guarda en la cual el ambiente es controlado para minimizar el flujo de calor

lateral en el espécimen, y el flujo de calor a través de las paredes de la *Hot Box*. Para el caso de *Hot Box* calibrada, no es necesario mantener la temperatura del aire interior de la caja climática igual a la temperatura del aire exterior. De manera general los dos aparatos propuestos tienen como objetivo reproducir condiciones de frontera estándar entre el espécimen de prueba y dos fluidos circulantes, usualmente aire atmosférico en cada lado, a temperatura uniforme. Ambos aparatos son para especímenes verticales. Finalmente, se presenta el procedimiento para evaluar U , y la resistencia térmica R , de materiales de envolventes de construcción, como función de las temperaturas del aire, de la superficie de prueba y de la potencia de entrada en la cámara caliente.

ISO 10292 (1994) presenta la metodología y los valores de referencia para el cálculo de U en la región central del vidriado ya sea inclinado u horizontal. La norma aplica a vidriados, vidriados con recubrimiento y materiales opacos en el lejano infrarrojo no toma en cuenta superficies con recubrimiento con emisividad modificada, ni efectos combinados de las orillas debidos a puentes térmicos a través del sello de un vidriado o a través de marcos. Proporciona las ecuaciones para calcular la transmitancia térmica, la conductancia radiativa y la conductancia del gas. Menciona que son necesarias las emisividades corregidas de las superficies para calcular la conductancia radiativa. Para las superficies de vidrio, la emitancia corregida utilizada es de 0.837 y para superficies con recubrimiento la emitancia normal, la cual se obtiene de mediciones con un espectrofotómetro. También muestra las emisividades corregidas en forma de tablas. Además, se proporcionan propiedades termofísicas de gases y trata el caso de gases que absorben en el infrarrojo. Los coeficientes de transferencia de calor externos son función de la velocidad del viento y son aproximados por $h_e=10.0+4.1v$. Se menciona que el valor de $h_e=23 \text{ W/m}^2\text{K}$ es utilizado para propósitos de comparación. Los coeficientes de transferencia de calor internos, se toman como $h_i=h_c+h_r$ en donde el coeficiente convectivo de transferencia de calor es $h_c=3.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ para convección libre. Si se cuenta con un ventilador ya sea arriba o debajo del interior de la ventana, este valor es mayor. La conductancia radiativa para superficies de vidrio normales es de $h_r=4.4\varepsilon/0.837$. Se concluye que para superficies de vidrio ordinarias verticales y convección libre se calcula como:

$h_i=4.4+3.6=8.0$ W/m²K. Adicionalmente, la norma presenta valores de referencia para varios parámetros del vidrio.

Harrison y Collins (1999) describieron el diseño, la calibración y el uso de un calorímetro solar para el medio ambiente de Canadá, construido en el laboratorio de calorimetría Solar ubicado en la Universidad de Queen en Kingston, Ontario. En este trabajo se mencionó que existen varios métodos para determinar el U y el $CGCS$ de sistemas de ventanas que generalmente son métodos de cálculo (manual de tablas de consulta o modelos de simulación por computadora) o experimentales (medidas calorimétricas realizadas bajo condiciones ambientales de laboratorio simuladas o al aire libre en condiciones ambientales reales). En la construcción del calorímetro se consideró la ganancia de calor a través de las paredes de tal forma que se conozca la ganancia neta de calor a través de la ventana vidriada, utilizando un material aislante de propiedades conocidas en vez de un espécimen de vidrio. El calorímetro se construyó con un flujo de bucle que permitía la extracción o adición de calor al interior del calorímetro. La instrumentación del equipo se hizo a base de termopares y termopilas calibradas.

ASTM C-1114 (2000) presenta un método para la determinación de las propiedades de transmisión térmica en estado permanente que utiliza el efecto Joule en una superficie plana. Este método se aplica a muestras de aislamiento térmico plano y delgado. El aparato consta de un calentador delgado y dos placas frías. El calentador del aparato suministra potencia uniforme a la muestra. El principio del aparato consiste en la determinación del flujo de calor a través de una muestra, la temperatura de la cara fría y la temperatura de la cara caliente. El calentador es delgado para hacer posible que el flujo de calor lateral a lo largo del plano de calefacción sea insignificante, por lo que no hay necesidad de aislamiento y control separado de la temperatura de la región de la guarda, sin embargo, se requiere del control de la temperatura de los alrededores. La baja masa del aparato con calentador delgado minimiza el error y permite que el aparato alcance el estado permanente en un tiempo corto. Las propiedades de transmisión térmica se calculan aplicando la Ley de Fourier en donde el flujo de calor se calcula a partir de la potencia eléctrica suministrada. En estos aparatos se estima que el error máximo en la determinación de las propiedades de transmisión térmica sea un

máximo de 3%, y un mínimo de 2%, cuando se realizan pruebas a una temperatura de 300K manteniendo una diferencia de temperatura entre la cara fría y la cara caliente de 1.1K.

NOM-008-ENER (2001) en su Apéndice B, presenta un método teórico de cálculo para U a partir de la conductividad térmica del material y los coeficientes de transferencia de calor al interior y al exterior, los cuales son fijados convencionalmente. La metodología se basa en obtener la conductancia de un sistema de resistencias en serie. El método se utiliza para paredes compuestas, siempre y cuando sea conocido el espesor y la conductividad térmica de cada uno de los materiales. La metodología se basa en un edificio de referencia que tienen un 40% de elementos no opacos (transparentes) en las paredes y un 5% de elementos no opacos en el techo. En la norma no se especifica una metodología particular para el cálculo de propiedades térmicas y ópticas de vidriados.

NFRC 300 (2004) Establece métodos de prueba para la determinación de las propiedades ópticas de materiales vidriados y sistemas. Esta norma cubre la determinación de las propiedades ópticas mediante cálculos y mediciones, que tienen relación con la transferencia de energía en vidriados especulares planos. Incluye el cálculo de varias propiedades que derivan de mediciones espectrales, incluyendo transmitancia y reflectancia. El procedimiento de medición especifica que se miden transmitancias y reflectancias espectrales en el intervalo de longitud de onda de 300 a 2500nm.

ASTM C-1363 (2005) presenta una metodología para evaluar el desempeño térmico de materiales de componentes de envolventes térmicas en edificaciones utilizando cámaras de ambiente controlado. La norma establece los principios para el diseño y la calibración de un aparato *Hot Box*. El diseño del aparato consta de dos cámaras de ambiente controlado, una cámara climática y una cámara de medición; un marco para el montaje del espécimen de prueba y el espacio que rodea al espécimen de prueba. El marco con el espécimen de prueba se coloca en medio de las dos cámaras, las mediciones se realizan de lado de la cámara de medición. Con el dispositivo se controlan condiciones de temperatura, velocidad de aire, humedad y radiación durante las pruebas con intervalos de incertidumbre recomendados. Con el método se pueden realizar pruebas bajo condiciones de convección natural y forzada, así como para realizar pruebas a especímenes colocados en diversas orientaciones. En la norma se

detallan los requerimientos para la caracterización y calibración del dispositivo, así como recomendaciones para la instrumentación a utilizar y las incertidumbres permitidas en las mediciones.

ASHRAE (2005) define en el Capítulo 31 de Fenestración que las principales figuras de mérito que caracterizan térmicamente a los sistemas vidriados son el U y el $CGCS$. Para calcular U se deben separar las partes del sistema vidriado, y evaluarse en el centro del vidriado, en los bordes del vidriado y en el marco. Para el centro del vidriado, el cálculo de U considera la transferencia de calor convectiva y radiativa en el espacio del gas, así como también los coeficientes de película al interior y al exterior. El método para evaluar U se basa en el método de las resistencias térmicas, que consiste en la suma en serie y paralelo de las resistencias de los componentes del sistema vidriado y del efecto de película interior y exterior; se definen coeficientes de transmitancia de película exterior y uno de interior. La conductividad térmica depende del tipo de vidriado, y en general la transmitancia térmica, toma en cuenta el número de capas de vidrio, dimensiones de espacio del gas, la orientación relativa a la vertical, la emisividad de cada superficie y composición del gas. En el documento se mencionan programas de cómputo que pueden ser utilizados para estimar la unidad de transferencia de calor para una amplia gama de vidriados para la construcción, aprobados por la NFRC, WINDOW 5.2 (LBL, USA 2003) para evaluar el centro del vidriado. También en este documento se define el coeficiente de sombreado como la razón entre el coeficiente de ganancia de calor solar de un sistema vidriado para un ángulo particular de incidencia y el $CGCS$ de un vidriado de referencia estándar para el mismo ángulo de incidencia y distribución espectral. Considerando a un vidriado claro de 3mm como referencia, es común calcular el CS de una muestra específica multiplicando el $CGCS$ de la muestra por 1.15 o dividiéndolo entre 0.87.

ISO 11357-04 (2005) presenta un procedimiento por calorimetría diferencial de barrido para determinar el C_p . La cantidad de calor se determina considerando los cambios de temperatura de una cantidad de sustancia de referencia. En el procedimiento se determina la incertidumbre en el flujo de calor debida a la incertidumbre en el C_p de la sustancia de referencia. El utilizar una sustancia caracterizada adecuadamente en el intervalo de temperaturas de pruebas, permite

que esta técnica calorimétrica de comparación tenga incertidumbres menores a 1%. La forma de determinar la incertidumbre se puede aplicar a la calorimetría de flujo conociendo la incertidumbre en el C_p del agua.

ISO 13786 (2007) especifica las características térmicas relacionadas con el comportamiento térmico dinámico de componentes y proporciona una metodología de cálculo para evaluar el comportamiento térmico en estado transitorio de una edificación. En esta norma el cálculo se limita al efecto transitorio de una variación sinusoidal en la temperatura de las fronteras. También especifica los materiales necesarios para la adecuación de la muestra a medir. Dado que las características dependen de la forma en que los materiales se combinan para formar componentes del edificio, la norma no es aplicable a los materiales de construcción o de componentes inconclusas del edificio. Esta norma hace homólogos de conceptos térmicos con conceptos eléctricos, definiendo así las características térmicas más relevantes que determinan la inercia térmica, estas son la admitancia térmica, la capacitancia térmica, el factor de amortiguamiento y el factor de desfase. En el documento se menciona que en pruebas con variaciones de tiempo corto deben establecerse períodos de un día, como las que resultan de los sistemas de control de temperatura. Para la aplicación de esta norma se requieren conocer los planos de detalles del producto con dimensiones y las propiedades de los materiales utilizados en el sistema como son la conductividad térmica λ , la densidad ρ , y el C_p . Los datos que pueden ser obtenidos de aplicar esta norma son: la temperatura al interior de la habitación, el pico máximo de energía, la potencia de enfriamiento o calentamiento y el efecto del acondicionamiento intermitente del aire. Además, se puede obtener la descripción de parámetros transitorio en términos de la frecuencia y en términos de la amplitud de la temperatura. En los anexos del documento se presentan tres aproximaciones para calcular la capacitancia térmica.

NFRC 201 (2010) presenta la metodología para la medición del *CGCS* de sistemas con aperturas vidriadas que permitan el control de la interacción de la radiación solar con su interior, utilizando métodos de calorimetría en cajas calientes. La evaluación térmica del *CGCS* para sistemas vidriados se realiza caracterizando la celda calorimétrica mediante el siguiente procedimiento: a) calibración del flujo total de calor del calorímetro, b) calibración

de las pérdidas de calor por la envolvente a causa de equipos internos, y c) evaluación de la constante de tiempo. La metodología de prueba para evaluar el *CGCS* se realiza considerando la incidencia de radiación solar normal, el calor extraído por un sistema de refrigeración y de las pérdidas o ganancias de calor a través de la envolvente del calorímetro. La evaluación se realiza calculando el *CGCS* para cada condición de prueba con diferencias de temperaturas entre el interior y el exterior del calorímetro con la incidencia de radiación normal al espécimen de prueba. Se recomienda realizar la prueba a un vidriado de 3mm antes de realizar pruebas a otros materiales. Adicionalmente, este documento proporciona información detallada acerca de los aparatos de medición, la instrumentación, recomendaciones de construcción de la celda calorimétrica, y de las condiciones ambientales que se deben cumplir para caracterizar la envolvente del calorímetro de pruebas y para la evaluación térmica de sistema vidriados.

Macías-Melo y Flores-Prieto (2013) presentaron el diseño, construcción y calibración de un calorímetro basado en los procedimientos y requerimientos indicados en ASTM C-1363-2005, NFRC-201-2010 e ISO 8990-1994. El calorímetro se diseñó para pruebas bajo condiciones al exterior, para evaluar los flujos de calor que entran y salen de un calorímetro a través de todas las paredes, y determinar los coeficientes convectivos de transferencia de calor. Los autores determinaron el *CGCS* y el *U* con variaciones diarias de 0.012 y 0.77 W/m² respectivamente.

En esta sección de la revisión bibliográfica se encontró que las figuras de mérito más ampliamente utilizadas en estándares internacionales para la caracterización térmica de sistemas vidriados son el *CGCS* y el *U* [ASHRAE (2005), Harrison y Collins (1999)]. La evaluación de estas figuras de mérito se hace mediante metodologías en estado permanente [ISO 8990 e ISO 10292 (1994), ASTM C-1114 (2000), NOM-008-ENER (2001), ASHRAE y ASTM C-1363 (2005), NFRC 201 (2010)]. Existen metodologías teóricas que implican la obtención de *U* a partir de correlaciones establecidas, tales como los coeficientes de transferencia de calor y la ecuación de suma de resistencias en serie o paralelo como señalan: la NOM-008 (2001), ISO 10292 (1994) y ASHRAE (2005). Por otro lado, se aprecian metodologías experimentales o teórico experimentales para la obtención del *U* y el *CGCS* que implican calorimetría [ISO 8990 (1994), NFRC 201 (2010), ISO 9050 (2003)]; metodologías

en las que el U es obtenido también fijando valores de coeficientes convectivos. Para la evaluación del U a partir de la suma de resistencias, es necesario determinar la conductividad del material mediante metodologías que generalmente se basan en la ecuación de conducción de calor unidimensional en estado permanente (ley de Fourier) [ASTM C-1114 (2000)].

También, se encontró que existen normas como la ISO 13786 (2007) que especifica las figuras de mérito relacionadas con el comportamiento térmico dinámico de componentes, que describen mejor el desempeño térmico de las componentes de las edificaciones pero que presentan métodos de evaluación más complicados que las figuras de mérito en estado permanente. Aunque la capacitancia térmica ya esté definida en la norma como una figura de mérito del comportamiento dinámico, el C_p se sigue determinando principalmente por calorimetría diferencial de barrido y de flujo como marca ISO 11357 (2005).

1.2.2 Modelado dinámico de sistemas e identificación de parámetros.

Balaras (1996) estudió la importancia de la masa térmica de envolventes de edificaciones y su influencia en el ahorro energético. En el trabajo se presentan diferentes modelos para el estudio de las cargas de enfriamiento, definiendo a las funciones de transferencia como un método sencillo para el cálculo de las cargas térmicas. En las conclusiones se observa la importancia de la capacidad de almacenamiento térmico de los materiales y la influencia del posicionamiento y orientación en la edificación sobre los flujos de calor.

Jiménez y Madsen (2008) presentaron modelos para la descripción transitoria del comportamiento térmico de los envolventes de edificaciones tales como: los modelos estocásticos lineales espaciales, modelos estocásticos de funciones de transferencia, funciones de respuesta a excitaciones de impulso y escalón, la función de respuesta de frecuencia y el modelo de regresión lineal. En el apartado de funciones de transferencia emplean la transformada Z para modelar una ecuación en tiempo continuo t de forma discreta. Los autores concluyen que para modelar adecuadamente las características térmicas del material se deben utilizar modelos no lineales y para todos los modelos se debe considerar la radiación infrarroja en la metodología a emplear.

Baker y Van Dijk (2008) presentaron un estudio sobre la evolución que han tenido las pruebas en estado transitorio para la evaluación de componentes de edificaciones, impulsadas por las actividades de investigación de la Red PASLINK. Además, presentaron una revisión del desarrollo histórico de los procedimientos de ensayo y análisis que se encuentran actualmente en uso y desarrollo. Los autores mostraron que la caracterización de componentes de edificaciones se ha realizado con métodos en estado permanente y se han mejorado con el desarrollo de métodos de prueba transitorios. En el método en estado permanente se determinan las características térmicas U y $CGCS$. En el método en estado transitorio los efectos debido a la acumulación de calor en las muestras pueden ser estimados utilizando identificación de parámetros. Los métodos transitorios permiten realizar pruebas de corta duración y proporcionan información completa sobre el desempeño térmico de la componente o el sistema. En paralelo con la mejora de la metodología de pruebas, se han desarrollado herramientas de software que permiten identificar las características térmicas de las componentes y proporcionan información estadística sobre las incertidumbres de los datos de prueba en estado transitorio. Además, los autores mostraron que la caracterización del desempeño de la componente o sistema, mediante identificación de parámetros mejora la certidumbre de los resultados en comparación con los métodos de prueba en estado permanente.

Jiménez *et al.* (2008a) presentaron la aplicación de la herramienta de identificación de *Matlab*, *Ident*, para estimar las propiedades térmicas de componentes de edificaciones. La identificación de parámetros se realizó con modelos lineales invariantes en el tiempo tipo RC. Para la identificación de los parámetros de las ecuaciones del modelo se utilizó un método auto-regresivo de identificación ARMAX que es una modificación del método ARX, ambos métodos presentaron una expresión polinomial para la función de transferencia cuyos coeficientes pueden ser determinados por mínimos cuadrados o variable instrumental.

Jiménez *et al.* (2008b) Presentaron una descripción de los análisis y el procedimiento seguido en la identificación y solución de algunos problemas que se encuentran cuando los componentes del edificio son evaluados para determinar el coeficiente global de transferencia de calor por unidad de área UA , y la transmitancia solar por unidad de área τA , en una celda

PASLINK bajo condiciones climáticas cálidas y moderadas. Se analizaron varios conjuntos de datos registrados bajo diferentes condiciones meteorológicas y de prueba. En primer lugar se describieron los problemas identificados en la aplicación de los procedimientos de prueba y los análisis lineales habituales como son los modelos de resistencia-capacitancia RC, y funciones de transferencia. Los problemas identificados fueron: los análisis lineales a nivel de la celda de prueba, las evaluaciones de linealidad de los componentes por un análisis lineal a nivel de componentes y la evaluación de la no linealidad de la frontera mediante un análisis lineal a nivel de la celda de prueba. Los resultados de las pruebas se compararon con valores obtenidos del código español y del programa WINDOW4. Cuando se utilizaron los modelos RC más comunes y los modelos lineales de funciones de transferencia para estimar UA y τA a nivel de la celda de prueba los análisis mostraron grandes discrepancias entre los valores obtenidos y los esperados. Pero aunque efectos no lineales se presentaron en el intercambio de calor a través de la componente, los modelos lineales proporcionaron estimaciones lo suficientemente buenas para U en los análisis a nivel de la componente.

Jiménez *et al.* (2009) presentaron tres diferentes análisis dinámicos para obtener el U de las componentes de edificaciones. El primer análisis se hizo estudiando modelos RC a través del programa LORD, en el segundo análisis se estudiaron modelos basados en funciones de transferencia a través del sistema de identificación de MATLAB, el último análisis se hizo sobre ecuaciones diferenciales estocásticas utilizando modelado estocástico en tiempo continuo. Los modelos RC utilizados en sus diferentes condiciones consideraban una única capacitancia en la pared de la celda de pruebas, evaluada de acuerdo a los procedimientos de las celdas PASLINK, la entrada del sistema podía ser solo la temperatura exterior, o bien, la temperatura exterior y un flujo de calor, y en su forma más completa, la temperatura, el flujo y la radiación; las salidas del sistema podían ser las temperaturas o los flujos de calor interiores. En los modelos la radiación solar podía ser considerada como una variable o no. En el trabajo se observa que de acuerdo a los resultados obtenidos y comparándolos con los resultados (rango de U de 0.15 a 0.19 W/m²K) que se obtienen a partir de los valores tabulados en el código español para las condiciones térmicas en los edificios, los tres análisis del trabajo resultan apropiados para determinar el U de las componentes de edificaciones.

Gutschker (2010) presentó un trabajo en el que se describen algunos conceptos básicos del paquete de programas informáticos LORD que fue desarrollado durante los proyectos de PASLINK. El software LORD permite el modelado y la identificación de sistemas térmicos, particularmente componentes de edificaciones, considerando la solución de modelos de parámetros concentrados, es decir, describiendo el sistema térmico como un circuito térmico. Las componentes de edificaciones se representan por una o dos capacitancias conectadas con una resistencia térmica, donde cada nodo tiene su propia historia de temperatura dependiente del tiempo y del campo de temperatura entre dos nodos adyacentes que se asume lineal. El autor concluye que una posible mejora es el tratamiento estocástico de los datos.

Ghiaius y Hazyuk (2010) demostraron que la evaluación térmica de edificaciones puede ser un problema de control y presentaron la modelización de edificaciones a partir de circuitos térmicos RC. El modelo tiene como variables a las condiciones meteorológicas, las ganancias de calor internas, y la temperatura interior equivalente debido a los efectos de infiltración y ventilación. En el modelo RC, la masa de los elementos de la envolvente se representan con una sola capacitancia y su resistencia térmica se distribuye en dos partes iguales antes y después de la capacitancia. En el estudio se plantea una sola capacitancia interior equivalente a la del aire interior y a la de los muebles. La solución del problema se realizó resolviendo las ecuaciones del modelo RC con la transformada de Laplace para obtener sus funciones de transferencia. Con los resultados obtenidos del modelo fue posible predecir los flujos de calor y las temperaturas al interior de la edificación y tomar decisiones de control para el calentamiento al interior tomando en cuenta un estudio económico.

Morayta (2012) presentó el desarrollo de un código numérico para determinar la conductividad térmica de un sólido, empleando la teoría del Problema Inverso de Transferencia de Calor (PITC). La identificación de la conductividad térmica se hizo a partir de un perfil de temperaturas simuladas, en sus observaciones recomienda que las temperaturas se determinen de manera experimental.

Prívará *et al.* (2013) presentaron una visión general de los métodos de identificación para edificaciones y la factibilidad de su aplicación en el control predictivo. Clasificaron a las

técnicas de modelado de edificaciones en métodos de sub-espacio (4SID), métodos de predicción de error (PEM), métodos de modelado de identificación correspondiente (MRI), modelos semi-físicos deterministas que emplean modelos RC (DSPM), los modelos semi-físicos probabilísticos (PSPM) y los paquetes con herramientas de simulación como TRNSYS y Energy Plus (BEPST). En el trabajo describieron a los DSPM's como métodos que requieren los datos de planificación de los arquitectos e ingenieros y la información previa de la construcción. Los resultados de las evaluaciones con estos métodos se consiguen solo para tiempos definidos aunque no es necesario actualizar su modelo continuo, además no necesitan gran capacidad computacional para los procedimientos de estimación. En el trabajo se presentaron dos casos de estudio, el primero fue un ejemplo de la vida real de un gran edificio de oficinas en Munich, donde se aplicó un nuevo procedimiento que combina un modelo implícito construido en Energy Plus. El segundo caso fue el ejemplo de un edificio artificial modelado en TRNSYS lo que demostró que diferentes enfoques de identificación llevaron a resultados similares. Las respuestas obtenidas con los diferentes métodos presentaron residuales menores al 5% en la mayoría de los pasos y presentaron un error cuadrático medio por debajo del 4% lo que consideraron una predicción adecuada.

Macías-Melo (2013) presentó una metodología para determinar los coeficientes de una función de transferencia que permite predecir el flujo de calor al interior de un calorímetro solar. En el estudio empleó un circuito térmico con dos resistencias y un capacitor para encontrar los parámetros globales de la componente de edificación. En el trabajo menciona que la simulación con el modelo RC toma en cuenta la resistencia y capacitancia así como la excitación del sistema. En su trabajo toma como dato de entrada la magnitud de la excitación en tiempos discretos y aplica la transformada Z para determinar las funciones de transferencia en tiempo discreto considerando como datos de entrada los flujos de calor a través de la componente de edificación, la temperatura ambiente, la temperatura en la cara exterior, la temperatura en la cara interior, la temperatura en el ambiente interior, la determinación de los coeficientes convectivos, la velocidad de viento y la radiación solar. En los resultados se observó que las funciones de transferencia obtenidas para ambas muestras predicen de forma satisfactoria el comportamiento del flujo de calor interior en el conjunto de pruebas, aún con

valores de coeficientes convectivos diferentes. Además, en el espécimen de referencia se observó que a medida que el h_i se incrementa también se incrementa el flujo de calor al interior. El flujo de calor interior varía considerablemente cuando varía el h_i , llegando haber cambios hasta del 21%. El máximo error estándar de estimación obtenido en las funciones de transferencia fue de 5.79 ($R^2=0.97$) y 7.03 W ($R^2=0.84$) para el espécimen de referencia y para el vidrio de 6 mm, respectivamente. En este mismo estudio, utilizando un calorímetro basado en los procedimientos y requerimientos indicados en ASTM C-1363-2005, NFRC-201-2010 e ISO 8990-1994 se evaluó el comportamiento en estado transitorio de los coeficientes convectivos al interior y al exterior que se pueden presentar durante la determinación de las funciones de transferencia en sistemas vidriados. En su estudio, el autor reportó que el coeficiente convectivo al interior se varió de 7.98-18.37 W/m²°C mientras que el coeficiente convectivo al exterior h_e varió de 11.40-15.66 W/m²°C, y mostró que es posible obtener menor incertidumbre cuando se considera la variación de los h 's.

En esta sección se concluye que las actividades de investigación de la Red PASLINK han contribuido a la evolución que han tenido las pruebas en estado transitorio, demostrando que la caracterización de componentes de edificaciones se ha mejorado con el desarrollo de pruebas en estado transitorio [Baker y Van Dijk (2008)].

Ghiaus y Hazyuk (2010) concluyeron que la evaluación térmica de edificaciones puede ser un problema de control. Este análisis se ha venido abordando para realizar simulaciones con la modelización de edificaciones a partir de circuitos térmicos RC [Jiménez *et. al* (2008b y 2009), Ghiaus y Hazyuk (2010), Gutchsker (2010), Prívará *et. al* (2013), Macías-Melo (2013)], las funciones de transferencia del sistema [Balaras (1996), Jiménez y Madsen (2008), Jiménez *et. al* (2008b y 2009), Macías Melo (2013)] y con ecuaciones diferenciales estocásticas [Jiménez y Madsen (2008), Jiménez *et. al* (2009), Prívará *et. al* (2013)]. Se observó que para la solución de modelos RC se ha empleado el programa LORD [Jiménez *et. al* (2009), Gutchsker (2010)], y para la aplicación de las funciones de transferencia se han empleado otros paquetes matemáticos como Matlab[®] [Jiménez *et. al* (2009)]. Además, se observó el uso de los paquetes comerciales TRNSYS y Energy Plus en la simulación de edificaciones [Prívará *et. al* (2013)].

Los trabajos revisados sobre predicción del comportamiento térmico dinámico de edificación se han venido desarrollando con modelos invariantes en el tiempo con los cuales se encontraron resultados satisfactorios, en algunos casos hasta con residuales menores al 5% y errores cuadráticos medios debajo del 4% [Prívará *et. al* (2013)]. Además, se encontró que las evaluaciones en estado transitorio del U con modelos RC, funciones de transferencia y con ecuaciones estocásticas han arrojado resultados acordes a los reportados en la bibliografía [Jiménez (2009)].

1.3 Conclusión de la revisión bibliográfica.

Considerando las conclusiones de las Secciones 1.2.1 y 1.2.2 que corresponden a los métodos de prueba y al modelado dinámico de sistemas e identificación de parámetros, se observó de manera conjunta que las pruebas que se utilizan en estándares internacionales para la evaluación de las figuras de mérito de vidriados como el U y el $CGCS$ se han venido realizando con metodologías en estado permanente [ISO 8990 e ISO 10292 (1994), ASTM C-1114 (2000), NOM-008-ENER (2001), ASHRAE y ASTM C-1363 (2005), NFRC 201 (2010)]. Estas metodologías, se basan en correlaciones establecidas como la ecuación de suma de resistencias [NOM-008 (2001), ISO 10292 (1994), ASHRAE (2005)] y en pruebas calorimétricas, donde se consideran valores constantes de los coeficientes convectivos y de las propiedades termofísicas de los materiales, como la conductividad o las conductancias equivalentes, que a su vez, son determinadas también con metodologías en estado permanente [ISO 8990 (1994), NFRC 201 (2010), ISO 9050 (2003)]. También se observó que en los últimos años el análisis transitorio ha tenido un gran auge por la demanda de simulaciones de edificaciones para determinar el desempeño térmico de envolventes con nuevas tecnologías. Esto en virtud de que con un análisis transitorio se pueden obtener resultados con menor incertidumbre y menores tiempos de prueba experimental [Baker y Van Dijk (2008)]. Actualmente, la evaluación dinámica de las componentes de edificaciones se ha venido realizando con modelos lineales invariantes en el tiempo. Estos pueden ser: modelos de parámetros concentrados [Jiménez *et. al* (2008a, 2008b y 2009), Ghiaus y Hazyuk (2010), Gutchsker (2010), Prívará *et. al* (2013), Macías-Melo (2013)], modelos basados en las funciones de transferencia del sistema [Balaras (1996), Jiménez y Madsen (2008), Jiménez *et.*

al (1008b y 2009), Macías Melo (2013)] y empleando paquetes de simulación como TRNSYS y Energy Plus [Prívará *et. al* (2013)].

Los modelos en estado transitorio que se vienen empleando para la evaluación de edificaciones demandan parámetros característicos de envolventes que sean apropiados para un estudio dinámico. Los parámetros característicos equivalentes pueden ser determinados a partir de los coeficientes de la función de transferencia de un modelo RC, sin embargo este tipo de modelos no se ha venido aplicando para determinar propiedades termofísicas. Los estudios más recientes sobre esto han abordado la simulación de las edificaciones y la identificación de los parámetros U , $CGCS$ y τ a partir de los flujos de calor y temperaturas obtenidas de la simulación de la edificación.

1.4 Objetivos y alcances.

A continuación se presentan los objetivos y alcances del trabajo propuesto.

1.4.1 Objetivo general.

Determinar la capacitancia térmica de un vidriado mediante calorimetría solar e identificación de parámetros a partir de sus funciones de transferencias.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Establecer un modelo de resistencia-capacitancia para la descripción del fenómeno físico estudiado.
- Determinar las funciones de transferencia de un sistema vidriado.
- Identificar la capacitancia térmica equivalente de un vidriado.

1.4.3 Alcances.

- Estudiar un vidriado por medio de un modelo RC con la representación del vidrio a partir de una capacitancia y dos resistencias, para definir los parámetros térmicos de la componente.
- Determinar la capacitancia térmica de un vidriado de propiedades conocidas con datos experimentales para validar el método.

1.5 Estructura de la tesis.

En el Capítulo 2 se presenta el modelo físico y el matemático para la identificación de la capacitancia térmica del vidriado. En el Capítulo 3, se presenta el diseño experimental, el equipo experimental conformado por el calorímetro, la estación meteorológica y la plataforma de identificación de parámetros, así como, los procedimientos experimentales. En el Capítulo 4, se presentan los resultados de la identificación de los parámetros en el vidriado, y en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 2

Modelado Teórico.

En este capítulo se presenta el desarrollo del modelado teórico, tomando como base el modelo físico y el modelo matemático. En el modelo físico se describe en términos de flujos de calor la interacción entre el ambiente interior y exterior de un sistema vidriado, así como también la transferencia de calor a nivel de la componente vidriada. El modelo matemático se desarrolla con una representación del modelo físico en un modelo tipo RC, que a su vez se plantea en ecuaciones de función de transferencia en tiempo continuo y en tiempo discreto. La capacitancia térmica equivalente del vidriado se identifica una vez que se determinan los coeficientes de la función de transferencia. En este trabajo se plantearon dos modelos RC que se presentan en las secciones 2.2 y 2.3, respectivamente.

2.1 Marco teórico.

A continuación se presenta el marco teórico para el desarrollo del modelo físico y el modelo matemático.

2.1.1 Mecanismos de transferencia de calor.

Existen tres mecanismos en las que el calor puede transferirse, estos son: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor transfieren la energía del medio de mayor temperatura al de menor temperatura, cumpliendo con lo establecido en la Segunda Ley de la Termodinámica.

Conducción.

Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estático, ya sea líquido o fluido, se usa el término conducción para referirnos a la transferencia de calor que puede ocurrir a través de este. La transferencia ocurre de las partículas con mayor energía a las de menor energía. Esta interacción entre partículas puede darse por movimientos aleatorios de estas (difusión de la energía) o por movimientos vibratorios.

La cantidad de calor conducido a través de un material puede determinarse a partir de la Ley de Fourier. Para una pared plana unidimensional como se muestra en la **Figura 2.1**, en la que se tiene una distribución de temperatura $T(x)$, la ecuación de flujo se expresa con la **Ecuación 2.1** [Kreith y Bohn (2001)].

$$Q_{conducción} = -kA \frac{dT}{dx} \tag{2.1}$$

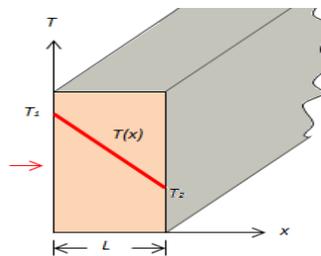


Figura 2.1. Temperaturas en una pared sólida.

Convección.

La convección se da entre una superficie y un fluido adyacente que se mueve sobre esta superficie, este proceso involucra a dos mecanismos. El primero es el mecanismo de conducción que se genera por el movimiento molecular, al mismo tiempo que sucede la transferencia de calor por el movimiento macroscópico de algunas fracciones del fluido.

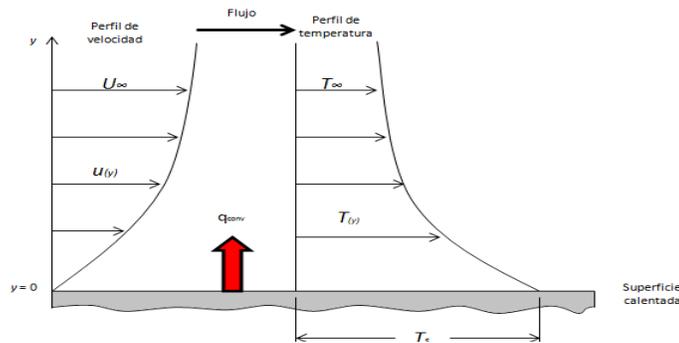


Figura 2.2. Perfiles de velocidad y temperatura sobre una superficie.

En la **Figura 2.2** se observan los perfiles de velocidad y temperatura sobre la superficie T_s . El gradiente de velocidad nos indica que debido a las fuerzas de viscosidad la velocidad del fluido en contacto con la superficie es cero, y que esta se incrementa a medida que la distancia a la superficie aumenta. La transferencia de calor depende en gran manera de la velocidad del fluido. En convección natural la velocidad del fluido disminuye después de alcanzar la velocidad máxima conforme se aleja de la superficie. En el caso de la convección forzada, a mayor distancia de la superficie, la velocidad tenderá a la velocidad inducida por el ventilador o la bomba. El perfil de temperatura es inverso a perfil de velocidades. Por lo que las capas del fluido más cercanas a una superficie caliente estarán a mayor temperatura, y esta disminuye conforme la capa se aleja de la superficie.

La razón de transferencia por convección entre una superficie y un fluido se determina con la Ley del Enfriamiento de Newton como indica la **Ecuación 2.2** [Holman (2002)].

$$Q_{convección} = h_c A(T_s - T_a) \tag{2.2}$$

Radiación.

La radiación es la energía que emite la materia en forma de ondas electromagnéticas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no necesita que exista un medio intermedio. La radiación es un fenómeno volumétrico, los sólidos, líquidos y gases, emiten, absorben e irradian en diferentes intensidades. Sin embargo, la radiación se puede considerar como un fenómeno de superficie para cuerpos opacos, como los metales, la madera y las rocas, ya que la radiación producida por las regiones interiores nunca alcanzan la superficie; mientras que la radiación que incide en ellos es absorbida por unas cuantas micras en la superficie. La máxima radiación que una superficie puede emitir depende de la temperatura absoluta de acuerdo a la Ley de Stefan-Boltzmann mostrada en la **Ecuación 2.3** [Mahan (2002)].

$$Q_{radiación} = \epsilon\sigma AT_s^4 \tag{2.3}$$

La transferencia neta de calor por radiación es la diferencia entre la energía que la superficie gana por absorción y la que pierde por emisión. Para el caso especial de una superficie y área superficial A con temperatura absoluta T_s , que está completamente encerrada por una superficie mucho más grande a temperatura absoluta T_{alred} , separada por un gas como se muestra en la **Figura 2.3**, la tasa neta de transferencia de calor por radiación se determina a partir de la **Ecuación 2.4** [Incropera y DeWitt (2002)]:

$$Q_{radiación} = \epsilon\sigma A(T_{alred}^4 - T_s^4) \tag{2.4}$$

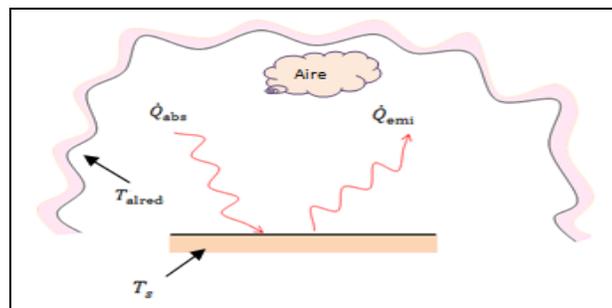


Figura 2.3. Cargas térmicas de radiación.

La **Ecuación 2.4** puede expresarse en términos del coeficiente radiativo h_r como:

$$Q_{radiación} = h_r(T_{alrd} - T_s) \quad (2.5)$$

Determinar la tasa neta de transferencia de calor por radiación entre dos superficies generalmente es complicado porque depende de las propiedades de las superficies, la orientación relativa entre ellas y la interacción del medio entre ellas.

Las temperaturas equivalentes se han creado para englobar los efectos de varias variables que no son fáciles de determinar en el proceso de transferencia de calor, como sucede en el intercambio radiativo. Para determinar la tasa neta de transferencia de calor en una pared al exterior con incidencia de radiación solar G , se considera a la temperatura sol-aire T_{sa} , de tal forma el flujo de calor a través de la pared debido a la radiación de onda corta y a la convección es:

$$Q_{pared} = h_{cr}(T_{sa} - T_s) \quad (2.6)$$

La T_{sa} está definida en la Guía técnica española para procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios como muestra la **Ecuación 2.7**. En la ecuación el tercer término hace referencia a la radiación de onda larga, cuando esta no es considerada el término desaparece:

$$T_{sa} = T_a + \frac{\alpha G}{h_{cr}} - \frac{h_r \Delta T_{cielo-alred}}{h_{cr}} \quad (2.7)$$

2.1.2 Analogía entre sistemas térmicos y sistemas eléctricos.

La analogía entre un circuito térmico y un circuito eléctrico puede resultar evidente ya que comparten en esencia muchas de sus definiciones, se puede construir un sistema eléctrico que se comporte igual que un sistema térmico.

La resistencia térmica R , es la capacidad del material de oponerse al flujo del calor, en un circuito eléctrico en vez del flujo de calor se tiene la corriente eléctrica. En el caso de

materiales homogéneos es la razón entre el espesor L , y la conductividad térmica del material λ ; en materiales no homogéneos la resistencia es el inverso de la conductancia térmica.

$$R = \frac{L}{\lambda} \tag{2.8}$$

En el caso de la existencia de un fluido; la resistencia térmica entre un fluido y la superficie del material es el inverso del coeficiente convectivo.

$$R = \frac{1}{h} \tag{2.9}$$

En la capacitancia térmica se almacena energía térmica y se define como la razón entre el calor almacenado y el cambio de temperatura, en un circuito eléctrico se hablaría del efecto de un capacitor. La Capacitancia térmica C de un material es el producto de donde su densidad ρ el área transversal A , su espesor L y su calor específico C_p .

$$C = \rho A L C_p \tag{2.10}$$

La capacitancia térmica de un recinto cerrado es:

$$C = \rho V C_v \tag{2.11}$$

En la **Tabla 2.1** se muestran las equivalencias más utilizadas entre un circuito eléctrico y el circuito térmico.

Tabla 2.1 Equivalencias de circuitos.

Capacitor eléctrico	Resistencia eléctrica		Capacitor Térmico	Resistencia térmica
$i = C \frac{dv_C}{dt}$	$i = \frac{V}{R}$		$q = \frac{dE}{dt}$	$q = \frac{T}{R}$
$e = \frac{q}{C}$	$e = iR$		$T = \frac{E}{C}$	$T = qR$

La analogía entre estos circuitos también existe en su análisis, aplicando análisis de mallas y de nodos basados en las leyes de Kirchhoff se obtienen las ecuaciones diferenciales lineales e invariantes que representan el comportamiento de los sistemas:

Análisis de malla

En un lazo cerrado, la suma de todas las caídas de tensión es igual a la tensión total suministrada. De forma equivalente, la suma algebraica de las diferencias de potencial eléctrico en un lazo es igual a cero.

$$\sum_{k=1}^n E_k = E_1 + E_2 + E_3 \dots + E_n = 0 \quad (2.12)$$

Análisis de nodo

En cualquier nodo, la suma de las corrientes que entran en ese nodo es igual a la suma de las corrientes que salen. De forma equivalente, la suma de todas las corrientes que pasan por el nodo es igual a cero

$$\sum_{k=1}^n I_k = I_1 + I_2 + I_3 \dots + I_n = 0 \quad (2.13)$$

2.1.3 Funciones de transferencia.

En la teoría de los sistemas las funciones llamadas “funciones de transferencia” se usan frecuentemente para caracterizar las relaciones de entrada y salida de sistemas de ecuaciones diferenciales lineales, invariantes en el tiempo. De manera más específica, la función de transferencia de un sistema de ecuaciones diferenciales lineales, invariantes en el tiempo, se define como la relación de la transferencia de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales sean cero [Ogata (1987)].

Algunas características de las funciones de transferencia son:

- La función de transferencia de un sistema es un modelo matemático que implica un método operacional de expresar la ecuación diferencial que relaciona la variable de salida con la variable de entrada.
- La función de transferencia es una propiedad del sistema en sí mismo, independiente de la magnitud y la naturaleza de la función de excitación.
- La función de transferencia incluye las unidades necesarias para relacionar la entrada con la salida; sin embargo, no proporciona información alguna concerniente a la estructura física del sistema.
- Si la función de transferencia de un sistema se conoce, puede estudiarse la salida o respuesta para varias formas de entrada teniendo presente la comprensión de la naturaleza del sistema.
- Si se conoce la función de transferencia de un sistema, ésta puede establecerse experimentalmente introduciendo entradas conocidas y estudiando la salida del sistema. Una vez establecida, una función de transferencia da una descripción completa de las características dinámicas del sistema, sin recurrir a su descripción física.

2.2 Modelo Físico.

Considerando una habitación con una pared vidriada, el intercambio de energía entre la habitación y el medio ambiente exterior se realiza principalmente a través de la pared vidriada. En la **Figura 2.4** se representan los flujos de calor a través de la envolvente vidriada, debidos a la irradiancia solar G , a la temperatura ambiente (exterior) T_e , y a la temperatura interior T_i .

En el caso de superficies vidriadas, debido a sus características ópticas, parte de la radiación solar que incide en este se refleja al medio ambiente (ρG), otra parte se transmite hacia el interior (τG) y el resto se absorbe a lo largo del trayecto en el sistema vidriado (αG). De manera simultánea, debido a las características térmicas del vidriado, por un lado, se presenta la transferencia de calor [$q = f(T)$] debido al potencial térmico entre el interior y exterior ($T_e - T_i$), y por otro, la transferencia de calor debida a la absorción de radiación en el vidriado y la disipación de calor hacia el interior y al exterior $(1-N)\alpha G$ y $N\alpha G$, respectivamente. Por lo que,

el flujo de calor que pasa al interior a través del vidriado q_i , está dado por la suma de τG , más la fracción de $N\alpha G$, más el flujo de calor a través de la muestra debido a la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior.

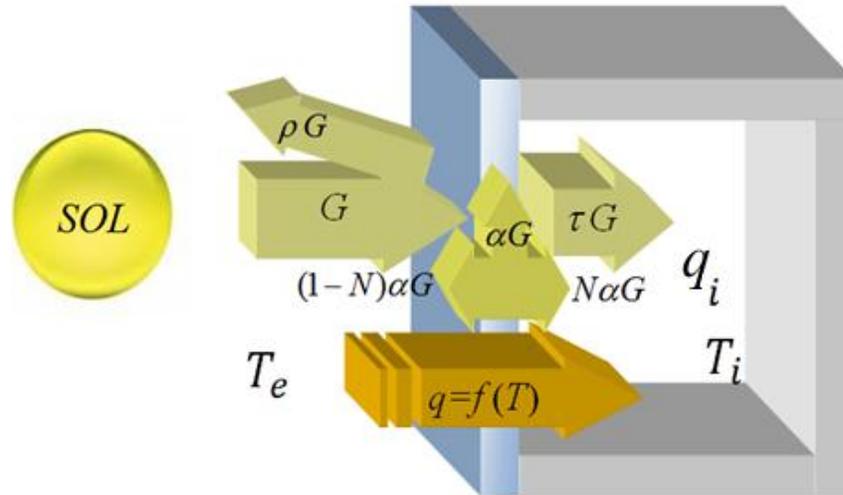


Figura 2.4 Modelo Físico.

La interacción del ambiente interior y exterior a través de la componente se representa con un circuito tipo RC, donde las resistencias son dependientes del espesor y de la conductividad de los elementos y de los coeficientes de transferencia de calor convectivos y radiativos. Los símbolos de capacitores del sistema representan naturalmente las capacitancias térmicas de los elementos. Las capacitancias se consideran como puntos de concentración de masa, que están uniformemente distribuidas en el interior del medio. De este modo, cuando existe más de una capacitancia, éstas son fracciones iguales de la capacitancia equivalente total del medio. La resistencia térmica total del medio se divide en fracciones iguales, dependiendo del número de capacitancias consideradas. En este trabajo se plantean dos modelos para ver los efectos de analizar el sistema completo o analizar únicamente a la componente vidriada. En la **Figura 2.5** se muestra el primer circuito RC propuesto (*Modelo 1*) que representa a los procesos de transferencia de calor entre el exterior y el interior de una habitación, donde el vidriado se representa con dos resistencias y una capacitancia, R_{v1} , R_{v2} y C_v respectivamente; y el aire al

interior se representa con la capacitancia C_i , las resistencias convectivas-radiativas al interior y al exterior se representan con R_i y R_e , respectivamente.

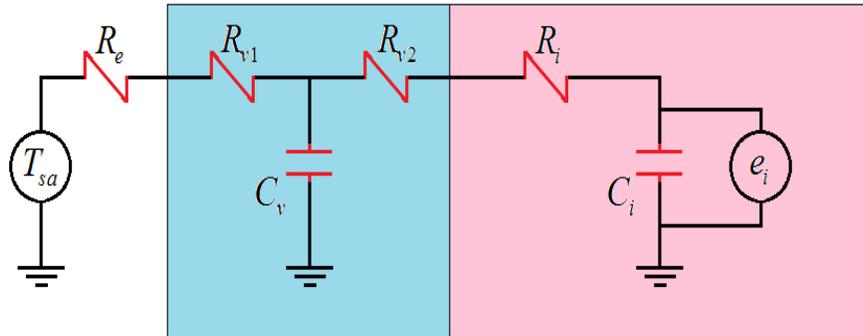


Figura 2.5 Circuito RC del sistema (*Modelo 1*).

Consideraciones del Modelo 1.

- El modelo considera que la absorción de la radiación se da en la superficie del vidrioado, y representa los efectos de la radiación G y la temperatura ambiente T_e , con la temperatura sol-aire T_{sa} .
- Se considera una excitación interior e_i representa los efectos de la radiación que pasa de primera intención debido a la transmitancia del vidrioado y a otros efectos como son la remoción de calor y las infiltraciones, que no se consideraron en el modelo de la **Figura 2.4**.
- El modelo considera que todo el sistema está a la misma temperatura en el momento inicial, y que a lo largo del tiempo la temperatura del interior es uniforme en todo el volumen.

Al igual que la interacción del exterior con el interior de una habitación, la transferencia de calor a nivel de la componente puede representarse mediante un circuito RC (*Modelo 2*) como el que se muestra en la **Figura 2.6**. El vidrioado se representa también mediante dos resistencias y una capacitancia, R_1 , R_2 y C_v . El modelo cuenta con dos fuentes de excitación,

T_{es} y T_{is} , las cuales representan a las temperaturas exterior e interior sobre la superficie de la muestra vidriada.

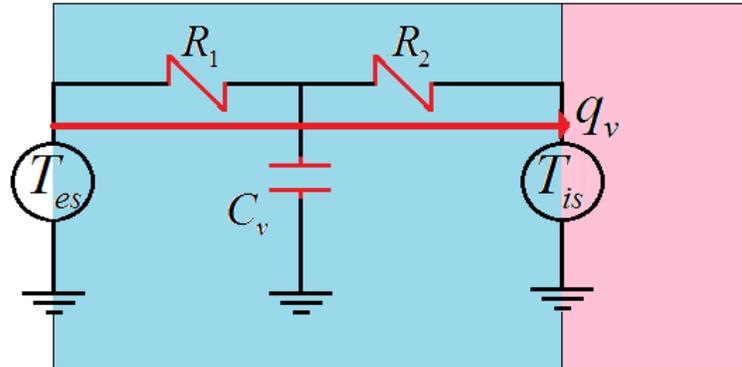


Figura 2.6 Circuito RC de la componente (*Modelo 2*).

Consideraciones del Modelo 2.

- En el modelo se considera que la temperatura inicial del vidriado es la temperatura promedio de las superficies. También considera que la temperatura de las superficies es uniforme en todo momento.
- El modelo considera el flujo de calor por conducción q_v , y desprecia la absorción de la radiación en el volumen del vidriado.

2.3 Modelo matemático (*Modelo 1*).

A continuación se presenta la formulación del modelo matemático para el *Modelo 1*.

2.3.1 Ecuaciones del circuito RC del sistema.

El circuito del *Modelo 1* se simplifica sumando las resistencias en serie. De este modo, se forman resistencias equivalentes; como se indica en las **Ecuaciones 2.14 y 2.15**. En el circuito q_1 es el flujo de calor almacenado debido a la capacitancia del vidriado, q_2 es el flujo de calor que pasa del exterior al interior por la componente y q' es el flujo de calor debido a la excitación interior.

$$R_1 = \frac{1}{h_{ce} + h_{re}} + \frac{L}{2\lambda} \tag{2.14}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_{ci} + h_{ri}} + \frac{L}{2\lambda} \tag{2.15}$$

donde h_{ce} y h_{ci} son los coeficientes convectivos al exterior y al interior, respectivamente, h_{re} y h_{ri} son los coeficientes radiativos al exterior y al interior, respectivamente, λ y L son la conductividad térmica y el espesor de la componente vidriada, respectivamente.

Las ecuaciones diferenciales que describen el funcionamiento del circuito RC del sistema se obtienen realizando un análisis de malla a partir de las leyes de Kirchhoff sobre el modelo RC presentado en la **Figura 2.7**. El análisis se hace en dos partes, la primera considerando la existencia únicamente de las mallas 1 y 2, y el segundo considerando la existencia solo de la malla 3, como se muestra en las **Ecuaciones 2.16, 2.17, 2.18 y 2.19**.

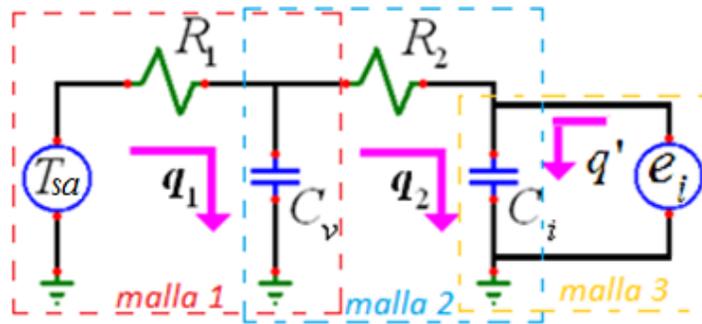


Figura 2.7 Circuito RC del sistema simplificado (*Modelo 1*).

Malla 1

$$T_{sa} = q_1 R_1 + \frac{1}{C_v} \int (q_1 - q_2) dt \tag{2.16}$$

Malla 2

$$-q_2 R_2 - \frac{1}{C_i} \int q_2 dt - \frac{1}{C_v} \int (q_2 - q_1) dt = 0 \quad (2.17)$$

$$T_i = \frac{1}{C_i} \int q_2 dt \quad (2.18)$$

Malla 3

$$T_i = \frac{1}{C_i} \int q' dt \quad (2.19)$$

2.3.2 Funciones de transferencia del sistema.

Las funciones de transferencia relacionan las condiciones de salida con las condiciones de entrada partiendo del modelo RC. En la determinación de las funciones de transferencia se emplean como parámetros de entrada y de salida a la temperatura al exterior y al interior, y a los flujos de calor al interior. La solución de los modelos RC depende de la naturaleza de la excitación que recibe. Si la magnitud de la excitación se conoce en todo tiempo (función continua), la solución se encuentra aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones diferenciales del modelo. Por otra parte, si la magnitud de la excitación es conocida sólo en instantes de tiempo (función discreta), la solución se obtiene aplicando la transformada Z.

2.3.2.1 Modelo en tiempo continuo (Transformada de Laplace).

La función de transferencia en tiempo continuo se obtienen aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones diferenciales que se obtienen del análisis de mallas del circuito (**Ecuaciones. 2.16, 2.17, 2.18 y 2.19**). En este proceso, el cambio de escritura de minúsculas a mayúsculas en las variables de flujos de calor, representa el cambio de dominio de t a s , como se observa en las **Ecuaciones 2.20, 2.21, 2.22 y 2.23**.

$$T_{sa}(s) = Q_1(s)R_1 + \frac{Q_1(s)}{sC_v} - \frac{Q_2(s)}{sC_v} \quad (2.20)$$

$$-Q_2(s)R_2 - \frac{Q_2(s)}{sC_i} - \frac{Q_2(s)}{sC_v} + \frac{Q_1(s)}{sC_v} = 0 \quad (2.21)$$

$$sC_i T_i(s) = Q_2(s) \quad (2.22)$$

$$T_i(s) = \frac{Q'(s)}{sC_i} \quad (2.23)$$

Despejando Q_1 de la **Ecuación. 2.21** se obtiene:

$$Q_1(s) = sC_v Q_2(s)R_2 + \frac{C_v}{C_i} Q_2(s) + Q_2(s) \quad (2.24)$$

Sustituyendo la **Ecuación 2.24** en la **Ecuación 2.20** se obtiene:

$$T_{sa}(s) = sC_v Q_2(s)R_2 R_1 + \frac{C_v}{C_i} Q_2(s)R_1 + Q_2(s)R_1 + Q_2(s)R_2 + \frac{1}{sC_i} Q_2(s) \quad (2.25)$$

Simplificando y agrupando la **Ecuación 2.25** se obtiene:

$$\frac{Q_2(s)}{T_{sa}(s)} = \frac{C_i s}{C_v C_i R_1 R_2 s^2 + (C_v R_1 + C_i R_1 + C_i R_2) s + 1} \quad (2.26)$$

Para relacionar a T_i con T_{sa} , se sustituye la **Ecuación 2.22** en la **Ecuación 2.26**, quedando de la siguiente manera.

$$H_1(s) = \frac{T_i(s)}{T_{sa}(s)} = \frac{1}{C_v C_i R_1 R_2 s^2 + (C_v R_1 + C_i R_1 + C_i R_2) s + 1} \quad (2.27)$$

La función de transferencia $H_1(s)$ de la **Ecuación 2.27** representa únicamente el comportamiento de la T_i con relación a la excitación exterior. El comportamiento de la T_i con relación a la excitación interior la define $H_2(s)$ en la **Ecuación 2.28**.

$$H_2(s) = \frac{T_i(s)}{Q'(s)} = \frac{1}{C_i s} \quad (2.28)$$

Se observa que los parámetros térmicos del vidriado solo están involucrados en la función de transferencia entre la T_i y la T_{sa} . Por lo anterior, consideramos al término $C_v C_i R_1 R_2$ como el primer coeficiente de función de transferencia CFT_{1MI} , y a $C_v R_1 + C_i R_1 + C_i R_2$ como el segundo coeficiente CFT_{2MI} , estos se pueden utilizar para la identificación de parámetros de vidriados.

Los CFT 'S se determinan de manera experimental, construyendo la **Ecuación 2.27** con datos de salida y entrada a partir del modelo experimental que se muestra en el Capítulo 3. Entonces, para la construcción de la **Ecuación 2.27** que es un modelo en tiempo continuo se parte de datos experimentales en tiempo discreto. Para esto, se construye primeramente una función de transferencia en tiempo discreto con los resultados experimentales y seguido se hace la transformación a tiempo continuo, como se indica en la siguiente sección.

2.3.2.2 Modelo en tiempo discreto (transformada Z).

Como se menciona en la sección anterior, el modelo en tiempo discreto permite determinar los coeficientes de la función de transferencia en tiempo continuo partiendo de datos en tiempo discreto. Para esto, las funciones de transferencia $H_1(s)$ y $H_2(s)$ obtenidas de las ecuaciones diferenciales del modelo RC en tiempo continuo se transforman en funciones en tiempo discreto en transformada Z. La **Ecuación 2.29** muestra a la aproximación de Tustin que se utiliza para transformar el tiempo continuo en tiempo discreto como lo ha hecho antes Macías-Melo (2013).

$$s = \frac{2(z-1)}{P(z+1)} \quad (2.29)$$

Sustituyendo la **Ecuación 2.29** en las **Ecuaciones 2.27** y **2.28** se obtiene:

$$H_1(z) = \frac{T_i(z)}{T_{sa}(z)} = \frac{1}{C_v C_i R_1 R_2 \left(\frac{2(z-1)}{P(z+1)} \right)^2 + (C_v R_1 + C_i R_1 + C_i R_2) \left(\frac{2(z-1)}{P(z+1)} \right) + 1} \quad (2.30)$$

$$H_2(z) = \frac{T_i(z)}{Q'(z)} = \frac{P(z+1)}{2(z-1)C_i} \quad (2.31)$$

2.3.3 Identificación de la capacitancia térmica.

La capacitancia térmica se determina a partir de los *CFT*'S de la **Ecuación 2.27**. A su vez, éstos se determinan de la función de transferencia $H_I(z)$ en términos de temperaturas al interior y exterior. Las funciones de transferencia en tiempo discreto obtenidas para la reproducción de T_i mostradas en las **Ecuaciones 2.30 y 2.31** obtienen la estructura de las **Ecuaciones 2.32 y 2.33**.

$$\frac{T_i(z)}{T_{sa}(z)} = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{a_0 z^2 - a_1 z - a_2} \quad (2.32)$$

$$\frac{T_i(z)}{Q'(z)} = \frac{d_0 z + d_1}{c_0 z - c_1} \quad (2.33)$$

Las **Ecuaciones 2.32 y 2.33** puede expresarse en ecuaciones en diferencias aplicando la transformada z inversa por división directa (dividiendo a cada una de las ecuaciones por la z de mayor orden) [Ogata (1996)]. De esta forma el orden de la función de transferencia se altera como se expresa en las **Ecuaciones 2.34 y 2.35**.

$$\frac{T_i(z)}{T_{sa}(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{a_0 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}} \quad (2.34)$$

$$\frac{T_i(z)}{Q'(z)} = \frac{d_0 + d_1 z^{-1}}{c_0 - c_1 z^{-1}} \quad (2.35)$$

Se despejan las **Ecuaciones 2.34 y 2.35** multiplicado de manera cruzada la salida con los polos de la ecuación y la entrada con los ceros, como se observa en las **Ecuaciones 2.36 y 2.37**.

$$T_i(z)(a_0 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}) = T_{sa}(z)(b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}) \quad (2.36)$$

$$T_i(z)(c_0 - c_1 z^{-1}) = Q'(z)(d_0 + d_1 z^{-1}) \quad (2.37)$$

A partir de la transformada z inversa se obtiene la secuencia de tiempo en los instantes de muestreo. De esta manera la transformada z inversa de $T_i(z)$ da como resultado una única $T_i(k)$ para cada período de muestreo como se observa en las **Ecuaciones 2.38 y 2.39**.

$$T_i(k) = b_0 T_{sa}(k) + b_1 T_{sa}(k-1) + b_2 T_{sa}(k-2) + a_1 T_i(k-1) + a_2 T_i(k-2) \quad (2.38)$$

$$T_i(k) = c_1 T_i(k-1) + a_2 T_i(k-2) + d_0 Q'(k) + d_1 Q'(k-1) \quad (2.39)$$

Los términos k , $k-1$ y $k-2$ representan la variable en el tiempo actual, la variable un período atrás y la variable dos períodos atrás, respectivamente.

Los coeficientes de función de transferencia en tiempo discreto se determinan realizando una regresión por mínimos cuadrados a partir de los datos obtenidos de temperaturas y flujos de calor, considerando las **Ecuaciones 2.36 y 2.37**. A partir de los coeficientes determinados se formulan las funciones de transferencia en tiempo discreto con la estructura de las **Ecuaciones 2.34 y 2.35**. Los coeficientes a_0 y c_0 son los asignados a su respectiva variable de salida en el tiempo actual, y valen uno.

Las funciones de transferencia formuladas en tiempo discreto ahora se trasladan al tiempo continuo con las mismas aproximaciones que se utilizan en la Sección 2.2.2.2 para trasladar las funciones del tiempo continuo al discreto.

La identificación de la capacitancia térmica se realiza con el coeficiente principal (s^2) de la función de transferencia que involucra a las propiedades del vidriado, el cual se expresa en la **Ecuación 2.38**.

$$C_i R_1 R_2 C_v = CFT_{1M1} \quad (2.38)$$

Considerando que las propiedades del vidriado y del sistema son conocidas, y que en la identificación de los CFT 'S se determina el valor correspondiente al CFT_{1M1} , entonces el valor de la capacitancia térmica se puede determinar con la **Ecuación 2.39**.

$$C_v = \frac{CFT_{1M1}}{C_i R_1 R_2} \quad (2.39)$$

2.4 Modelo matemático (Modelo 2).

A continuación se presenta la formulación del modelo matemático para el *Modelo 1*.

2.4.1 Ecuaciones del circuito RC de la componente.

El análisis a nivel de la componente se trabaja a partir del flujo de calor que se transfiere por esta. Para esto, el circuito de la **Figura 2.5** se divide en dos circuitos equivalentes. Uno en el que solo se consideran los efectos de la T_{es} y otro en el que solo se consideran los efectos de la T_{is} , como se muestra en la **Figura 2.8**. En ambos circuitos q_l indica el flujo de calor almacenado en la componente vidriada, mientras que q_{vi} se refiere al flujo de calor que pasa a través de la componente debido a T_{es} y q_{ve} es el flujo de calor que pasa por la componente debido a T_{is} . La diferencia de q_{vi} y q_{ve} da como resultado el flujo de calor q_v a través de la componente, como indican las **Ecuaciones 2.40, 2.41, 2.42 y 2.43**.

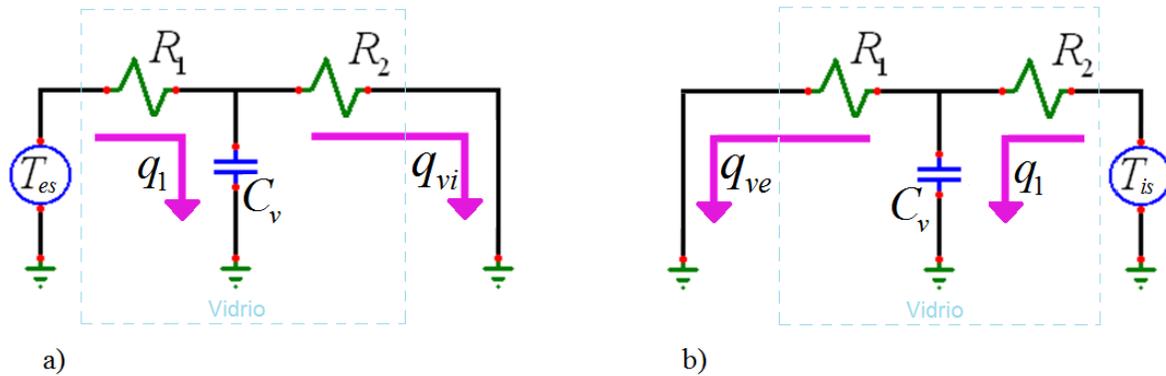


Figura 2.8 Circuitos equivalentes del *Modelo 2*. a) Influencia exterior. b) Influencia interior.

$$q_v = \lambda \frac{(T_{es} - T_{is})}{L} \tag{2.40}$$

$$q_{vi} = \lambda \frac{(T_{es} - T_m)}{L} \tag{2.41}$$

$$q_{ve} = \lambda \frac{(T_{is} - T_m)}{L} \tag{2.42}$$

$$q_{vi} - q_{ve} = \lambda \frac{(T_{es} - T_{is})}{L} \quad (2.43)$$

donde T_m es la temperatura media inicial de la componente vidriada.

Realizando el análisis de malla pertinente en los circuitos se obtienen las siguientes ecuaciones:

Circuito a)

$$\frac{1}{C_v} \int (q_1 - q_{vi}) dt + R_1 q_1 = T_{es} \quad (2.44)$$

$$\frac{1}{C_v} \int (q_{vi} - q_1) dt + R_2 q_2 = 0 \quad (2.45)$$

Circuito b)

$$\frac{1}{C_v} \int (q_1 - q_{ve}) dt + R_2 q_1 = T_{is} \quad (2.46)$$

$$\frac{1}{C_v} \int (q_{ve} - q_1) dt + R_1 q_2 = 0 \quad (2.47)$$

donde en ambos circuitos

$$R_1 = \frac{L}{2\lambda} \quad (2.48)$$

$$R_2 = \frac{L}{2\lambda} \quad (2.49)$$

2.4.2 Funciones de transferencia de la componente.

Modelo en tiempo continuo.

De la misma forma que en el *Modelo 1* la transformada de Laplace se aplica a las **Ecuaciones 2.44, 2.45, 2.46 y 2.47**, se despejan y se agrupan de la forma Q_{vi}/T_{es} y Q_{ve}/T_{is} , con lo que se obtiene lo siguiente:

$$\frac{Q_{vi}(s)}{T_{es}(s)} = \frac{1}{R_2 + R_1 + R_1 R_2 C_v s} \quad (2.50)$$

$$\frac{Q_{ve}(s)}{T_{is}(s)} = \frac{1}{R_2 + R_1 + R_1 R_2 C_v s} \quad (2.51)$$

Se observa que en un análisis a nivel de la componente las funciones de transferencia están formadas únicamente por parámetros térmicos del vidriado conjuntados en dos coeficientes. Por lo anterior, consideramos al término $C_v R_1 R_2$ como el primer coeficiente de función de transferencia CFT_{1M2} , y a $R_1 + R_2$ como el segundo coeficiente CFT_{2M2} .

Modelo en tiempo discreto.

Con la aproximación de Tustin aplicada a las **Ecuaciones 2.50** y **2.51** se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{Q_{vi}(z)}{T_{es}(z)} = \frac{1}{C_v R_1 R_2 \left(\frac{2(z-1)}{P(z+1)} \right) + (R_1 + R_2)} \quad (2.52)$$

$$\frac{Q_{ve}(z)}{T_{is}(z)} = \frac{1}{C_v R_1 R_2 \left(\frac{2(z-1)}{P(z+1)} \right) + (R_1 + R_2)} \quad (2.53)$$

2.4.3 Identificación de la capacitancia térmica.

Las funciones de transferencia en tiempo discreto expresadas en las **Ecuaciones 2.52** y **2.53** se agrupan en una sola ecuación en forma de diferencias como se expresa en la **Ecuación 2.54**, con el mismo procedimiento realizado en la Sección 2.3.3.

$$Q_v(k) = b_o T_{es}(k) + b_1 T_{es}(k-1) - a_1 Q_{vi}(k-1) - d_o T_{is}(k) - d_1 T_{is}(k-1) + c_1 Q_{ve}(k-1) \quad (2.54)$$

Con los coeficientes determinados, las funciones de transferencia en tiempo discreto se formulan con la estructura de las **Ecuaciones 2.55** y **2.56**. Los coeficientes a_0 y c_0 son los asignados a su respectiva variable de salida en el tiempo actual, y valen uno.

$$\frac{Q_{vi}(z)}{T_{es}(z)} = \frac{b_o z + b_1}{a_o z + a_1} \quad (2.55)$$

$$\frac{Q_{ve}(z)}{T_{is}(z)} = \frac{d_o z + d_1}{c_o z + c_1} \quad (2.56)$$

Las **Ecuaciones 2.55** y **2.56** se trasladan a su forma continua y la identificación de la capacitancia térmica se hace sin distinción del coeficiente principal de las funciones de transferencia, como se expresa en la **Ecuación 2.57**.

$$R_1 R_2 C_v = CFT_{1M2} \quad (2.57)$$

Despejando la capacitancia del vidriado, para un análisis a nivel de la componente, ésta se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{CFT_{1M2}}{R_1 R_2} \quad (2.58)$$

Capítulo 3

Diseño experimental.

En este capítulo se presenta la estrategia experimental que asiste al desarrollo del modelado y que se utiliza para validar sus resultados, el equipo experimental y su instrumentación. También se muestra una plataforma codificada para la identificación de la capacitancia térmica considerando la estrategia experimental y su verificación de funcionalidad para su aplicación en las pruebas experimentales.

3.1 Estrategia experimental.

En el Capítulo 2 se presentaron los dos modelos RC propuestos para la determinación de la capacitancia térmica. El *Modelo 1* considera un análisis a nivel de todo el sistema y el *Modelo 2* sólo a nivel de la componente o vidriado. El análisis a nivel de la componente se propone ya que puede arrojar menores desviaciones entre los valores obtenidos y los esperados, debido a que ambos modelos están basados en circuitos RC lineales e invariantes en el tiempo como lo ha reportado Jiménez *et. al* (2008b).

La capacitancia térmica identificada del vidriado C_{vT} , y la desviación δ_C , con relación a la capacitancia teórica del vidriado de referencia C_{vT} , se obtienen utilizando datos experimentales. Para esto, primero se determinan los CFT 'S en su forma discreta para después determinar los CFT 'S en tiempo continuo de acuerdo a la Secciones 2.2.3 y 2.3.3 para los *Modelos 1* y *2*, respectivamente. En el caso particular del *Modelo 1*, donde se consideran los coeficientes de transferencia de calor h_e y h_i , y la capacitancia equivalente interior del sistema C_i , éstos se determinan haciendo un ajuste del comportamiento de la temperatura real al interior $T_{i\ real}$, de acuerdo a lo descrito en la Sección 3.1.1. El proceso de la identificación de los coeficientes en tiempo discreto, tiempo continuo y de la capacitancia térmica está implementado en la *plataforma de identificación* desarrollada para este trabajo y detallada en la Sección 3.1.4.

En lo referente a los datos experimentales y condiciones ambientales, éstos se obtienen mediante calorimetría solar de acuerdo al método y equipo reportados por Macías-Melo (2013) y descritos en la Sección 3.2.

3.1.1 *Modelo 1*: Análisis al nivel del sistema.

Para desarrollar el proceso de identificación de la capacitancia térmica con el *Modelo 1* se requiere previo conocimiento de las excitaciones G , T_e y e_i , así como de la respuesta T_i , y de las propiedades termofísicas del material de referencia y los valores apropiados de h_e , h_i y C_i .

Con relación al período de análisis, las pruebas pueden realizarse indiferentemente en el día o en la noche. En el caso diurno, la prueba se hace de 11-13:00 horas (tiempo solar) con el fin de

tener irradiancia normal sobre el calorímetro de manera considerable. En este período la radiación que pasa de primera intención es aproximada como τG_{pc} , considerando como G_{pc} a la radiación en el plano del calorímetro.

La magnitud de las propiedades termofísicas del vidrio de referencia como la conductividad λ , el calor específico C_p , y la absortancia solar α , se consideran constantes con el cambio de temperatura, atendiendo a la característica lineal del modelo, y al carácter de modelo invariante en el tiempo. Así el C_{vT} es constante y se define como el producto del C_p , por la densidad ρ , por el volumen del vidriado V .

En lo referente a los coeficientes de transferencia de calor estos se consideran constantes a lo largo del período de análisis, por lo que deben ajustarse al valor más apropiado durante el período de prueba, al igual que la capacitancia equivalente interior. Para realizar el ajuste se proponen valores de h_i de 8 W/m²°C, h_e de 12 - 20 W/m²°C y C_i de 50 - 150 kJ/°C. El valor más adecuado de estos parámetros se determina comparando la $T_{i \text{ real}}$ con la $T_{i \text{ sim}}$ que se reproduce con las funciones de transferencia, formuladas de acuerdo a la Sección 2.2.2. Las reproducciones se hacen variando el valor de h_e desde el valor inicial propuesto hasta el valor final con un incremento de 1 W/m²°C, al tiempo que se mantiene fijo el valor de C_i . El procedimiento se repite variando el valor de C_i de 50-150kJ/°C con incrementos de 5kJ/°C. Las reproducciones para el ajuste de parámetros se expresa en el **Apéndice: Ajuste de parámetros**. Una vez determinados los valores adecuados de h_e , h_i y C_i , obtenidos de la reproducción que arrojó la desviación mínima entre $T_{i \text{ real}}$ y $T_{i \text{ sim}}$, se determina el valor de los $CFT^{\circ}S$ con los datos experimentales. La capacitancia térmica identificada C_{vI} , se determina con la **Ecuación 2.39** utilizando los valores ajustados de h_e y h_i para calcular R_1 y R_2 a partir de las **Ecuaciones 2.14** y **2.15**. La estrategia experimental descrita anteriormente puede apreciarse en la **Figura 3.1** en la secuencia del *Modelo 1*.

En una primera prueba la masividad del calorímetro se toma tal cual en su diseño original, y se considera a la relación de masividad calorímetro-muestra vidriada como el cociente de C_i y C_{vT} . En una segunda prueba la relación de masividad se reduce eliminando elementos internos de las paredes del calorímetro.

3.1.2 Modelo 2: Análisis al nivel de la componente.

A diferencia del *Modelo 1* la aplicación del *Modelo 2* no involucra parámetros de ajuste, como se muestra en la **Figura 3.1** en la secuencia del *Modelo 2*. Para su aplicación se requiere previo conocimiento de las temperaturas superficiales del vidrio (excitaciones) T_{es} y T_{is} , y de las propiedades termofísicas del vidrio de referencia. La respuesta a las excitaciones, son los flujos de calor a través de la componente q_v , q_{vi} y q_{ve} , los cuales se calculan con las **Ecuaciones 2.40-2.43**.

Al igual que en el *Modelo 1* la magnitud de las propiedades termofísicas del vidriado son constantes con el cambio de temperatura y el paso del tiempo, atendiendo a la característica lineal e invariante del modelo. Debido a que los flujos de calor se determinan con ecuaciones en estado permanente, las pruebas experimentales se realizan preferentemente en la noche. Lo anterior, debido a que durante la noche se presentan las variaciones más pequeñas en el comportamiento del flujo de calor. El flujo de calor simulado $q_{v\ sim}$, se obtienen con las funciones de transferencia formuladas de acuerdo a la Sección 2.3.2. La desviación promedio en la reproducción del flujo de calor δq , se obtiene al comparar al flujo reproducido $q_{v\ sim}$ con el flujo de calor real a través de la componente $q_{v\ real}$. La capacitancia térmica identificada C_{vt} , se determina con la **Ecuación 2.58** en la que las resistencias R_1 y R_2 se calculan a partir de las **Ecuaciones 2.48 y 2.49**.

3.1.3 Muestra de referencia.

La validación del modelado se hace utilizando un vidriado claro de 6.0 mm de espesor y un área de 1.0 m² como vidriado de referencia. En la **Tabla 3.1** se muestran las propiedades del vidriado de referencia utilizadas durante este trabajo, de acuerdo con Álvarez (1994) y software WINDOW 6.

Tabla 3.1 Propiedades del vidriado de referencia.

Propiedad	Magnitud	Unidades
λ	1.4	W/m ² °C
ρ	2500	kg/m ³
C_p	0.75	kJ/kg°C
V	0.006	m ³
τ	0.7	Adimensional
α	0.14	Adimensional

3.1.4 Plataforma de identificación.

La *plataforma de identificación* fue codificada en Matlab[®] considerando la estrategia experimental para la determinación de la capacitancia térmica del vidriado. La plataforma permite construir las funciones de transferencias a partir de una estructura general de acuerdo a los dos modelos desarrollados, mediante la asignación de las propiedades de los materiales involucrados y del número de capacitancias y resistencias consideradas en el sistema. La plataforma permite trabajar con datos experimentales o simulaciones importando los datos de las variables de entrada y salida correspondientes de archivos de Excel. En la **Figura 3.1** se muestra el diagrama de flujo de la *plataforma de identificación*. En el diagrama se marca en color rojo a la secuencia del *Modelo 2*, en color azul se marca a la secuencia del *Modelo 1* y en negro las secuencias comunes en ambos modelos. En la Sección 3.4 se presentan la verificación de la funcionalidad de la plataforma de identificación.

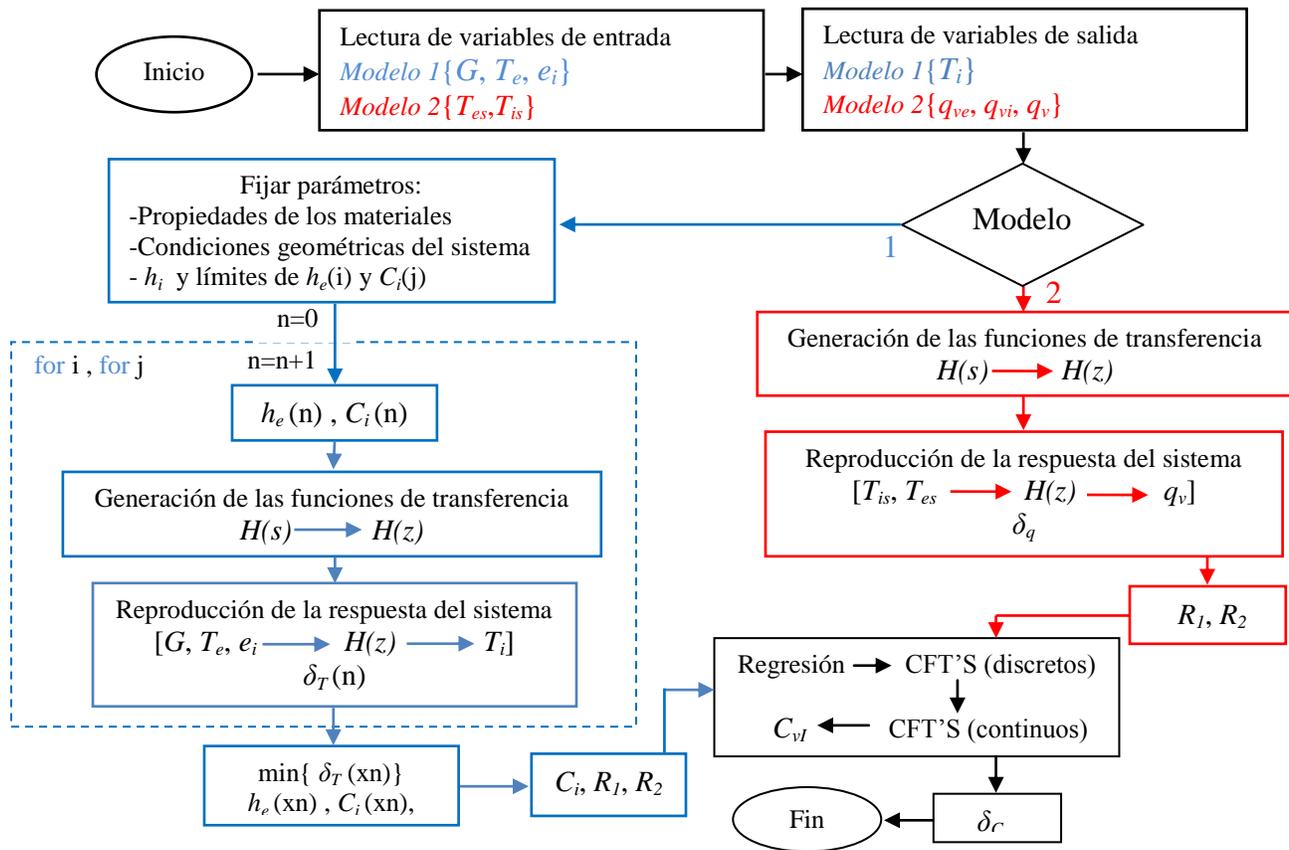


Figura 3.1. Diagrama de flujo de la plataforma de identificación.

3.2 Equipo experimental.

El experimento permite obtener las variables al exterior G y T_e , la temperatura al interior T_i , las temperaturas superficiales del vidrio T_{es} y T_{is} , los flujos de calor que entran, los flujos de calor que salen y los cambios de energía interna $Q_r, Q_{pl}, Q_{pp}, Q_{pm}, Q_a, Q_s$ y Q_b en intervalos de un minuto. En la **Ecuación 3.1** se define a la excitación interior considerada en las pruebas experimentales.

$$e_i = Q_r + Q_{pl} + Q_{pp} + Q_{pm} \quad (3.1)$$

El arreglo experimental se presenta en la **Figura 3.2**. El equipo experimental está compuesto por un calorímetro, un sistema de acondicionamiento de fluido, una caja isotérmica, una estación meteorológica, un sistema de adquisición de datos y una PC. El sistema de

adquisición de datos se utilizó para el monitoreo y registro de las variables del calorímetro y de la estación meteorológica.

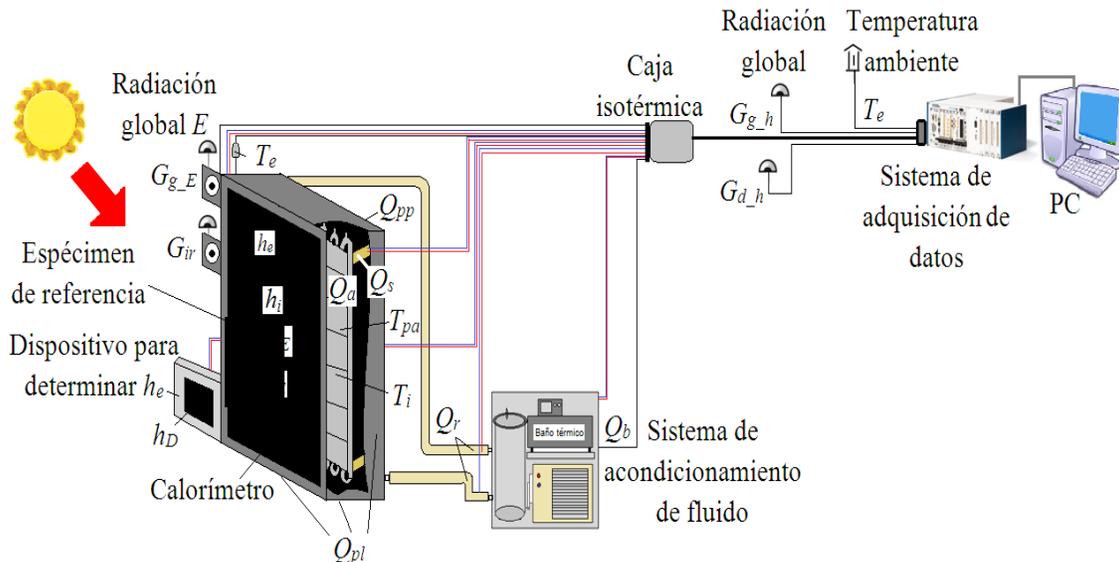


Figura 3.2 Equipo experimental.

3.2.1 Calorímetro.

El calorímetro se instrumenta con el fin de conocer las pérdidas de calor a través de su envolvente, la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de fluido del calorímetro, la diferencia de temperatura entre el ambiente interior y el ambiente exterior, la magnitud del flujo de agua suministrada a la placa absorbente y la energía suministrada por la bomba al recircular el fluido refrigerante por el calorímetro, como reporta Macías-Melo (2013).

3.2.2 Estación meteorológica.

Las variables meteorológicas de temperatura ambiente, velocidad de viento y radiación, se miden utilizando una estación meteorológica Maws 110 de Vaisala® de 16 bits. La temperatura ambiente y humedad relativa se mide utilizando un sensor Vaisala®-HMP50 con incertidumbre de $\pm 0.2^\circ\text{C}$ y $\pm 2\%$, respectivamente. La radiación global, radiación difusa y radiación infrarroja se miden utilizando piranómetros Eppley de primera clase tipo A con

incertidumbre de $\pm 1\%$. La velocidad y dirección de viento se miden utilizando un sensor Vaisala® WMS302 con una incertidumbre de ± 0.3 m/s.

En la **Figura 3.3** se presenta el calorímetro completo e instrumentado, dispuesto con una muestra vidriada. En esta figura se presenta una vista de la instrumentación, la estación meteorológica, el piranómetro en el plano del calorímetro y el dispositivo para determinar coeficientes convectivos.

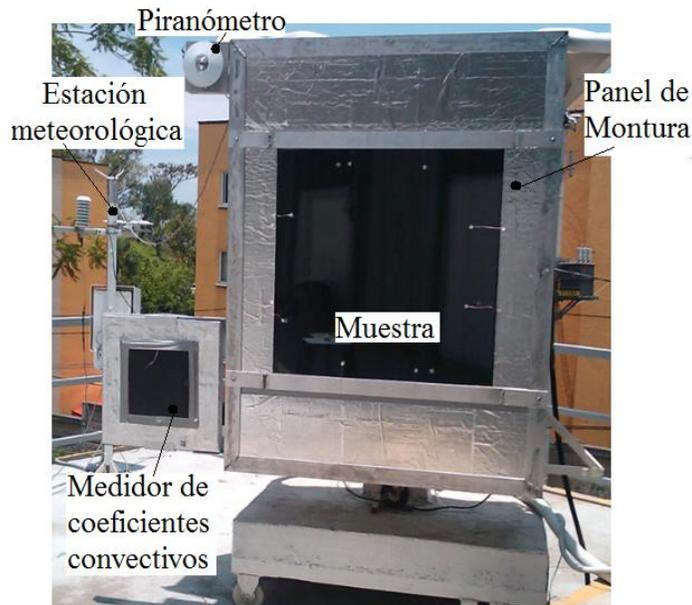


Figura 3.3. Vista frontal del calorímetro.

El sistema experimental se instrumentó de tal modo que los sensores del sistema de estudio están conectados a una caja isotérmica, como se muestra en la **Figura 3.4**. Esta caja isotérmica se utiliza para proporcionar una temperatura de referencia, mediante un termómetro de resistencia de platino TRP-100. La señal de salida de los sensores en el calorímetro y de la estación meteorológica son direccionadas al adquisidor de datos NI-PXI-1050 de 32 bit para su monitoreo y registro mediante el software Labview® 8.2.



Figura 3.4 Caja isotérmica.

3.3 Verificación de la funcionalidad de la *plataforma de identificación*.

La verificación de la funcionalidad de la plataforma de identificación se realizó con la identificación de la capacitancia térmica del vidrio de referencia a partir de condiciones hipotéticas de entrada y salida (simulaciones) para los *Modelos 1* y *2*. Con relación al diagrama de flujo de la *plataforma de identificación* presentado en la Sección 3.1.4, la única diferencia entre identificar con datos simulados y con datos experimentales; es que la respuesta no es importada a la plataforma.

Cabe mencionar que cuando se utilizan datos de entrada hipotéticos, la respuesta es simulada y tienen un comportamiento ideal, por lo que la desviación para cada punto discreto es cero.

3.3.1 Funcionalidad del *Modelo 1*.

Funciones de transferencia.

Para formular las funciones de transferencia para la verificación se utilizaron los parámetros correspondientes al vidrio de referencia expresados en la **Tabla 3.1**. Para calcular una capacitancia interior C_i , se supusieron en el interior del calorímetro 12 kg de cobre, 6 kg de agua y un volumen (V) de 0.937 m^3 de aire. En la **Tabla 3.2** se expresan las magnitudes de los parámetros al interior del calorímetro utilizados para las simulaciones. En la **Tabla 3.3** se muestra el valor correspondiente de las resistencias supuestas y las capacitancias teóricas.

Tabla 3.2 Parámetros de los materiales supuestos al interior del calorímetro.

Parámetros	Magnitud	Unidades
C_p (aire)	1.01	kJ/kg°C
ρ (aire)	1.204	kg/m ³
C_p (cobre)	0.385	kJ/kg°C
$h_e(h_{ce} + h_{re})$	18	W/ m ² °C
$h_i(h_{ci} + h_{ri})$	8	W/ m ² °C

Tabla 3.3 Resistencias y Capacitancias (*Modelo 1*).

Parámetros	Magnitud	Unidades
$R_1 (1/h_e + L/2\lambda)$	0.057	m ² °C/W
$R_2 (1/h_i + L/2\lambda)$	0.127	m ² °C/W
$C_{vT} (\rho * C_p * V)$	11.25	kJ/°C
C_{iT}	30.81	kJ/°C

Condiciones de prueba.

La simulación de las condiciones de entrada de prueba se hizo con la función seno para la temperatura ambiente y la radiación solar considerando un período diario. En la **Figura 3.5** se muestra el comportamiento de G_{pc} y T_e simulado para esta prueba.

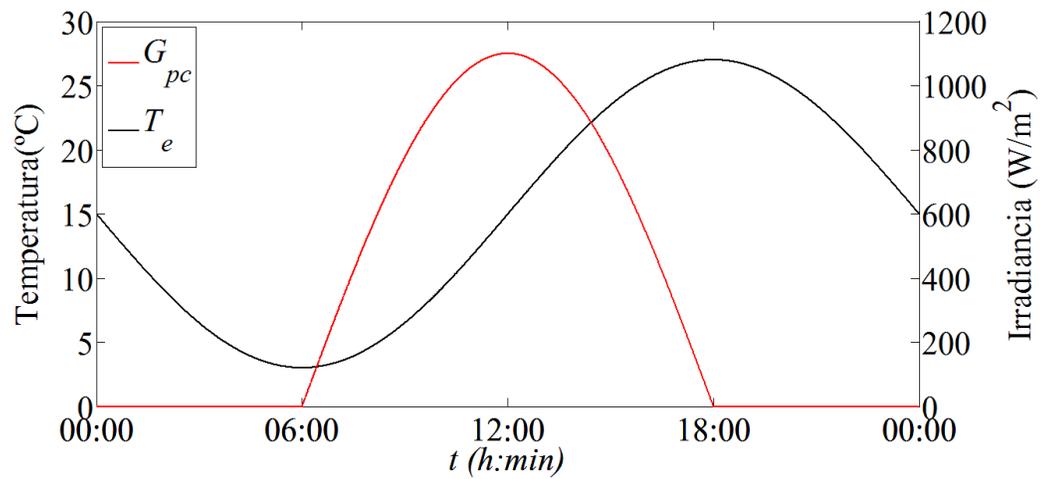


Figura 3.5 Comportamiento hipotético de G_{pc} y T_e .

Los efectos de G_{pc} y T_e se englobaron en la temperatura efectiva T_{sa} , de acuerdo a la **Ecuación 2.7** para el caso en el que no se considera radiación de onda larga.

$$T_{sa} = T_e + \frac{\alpha G_{pc}}{h_e} \quad (3.6)$$

En la **Figura 3.6** se describe el comportamiento de T_{sa} y el comportamiento de la temperatura interior como respuesta a esta excitación $T_{i ext}$. Como era de esperar, en un sistema con resistencia y capacitancia térmicas no despreciables, la respuesta se retrasa y se amortigua con relación a la excitación.

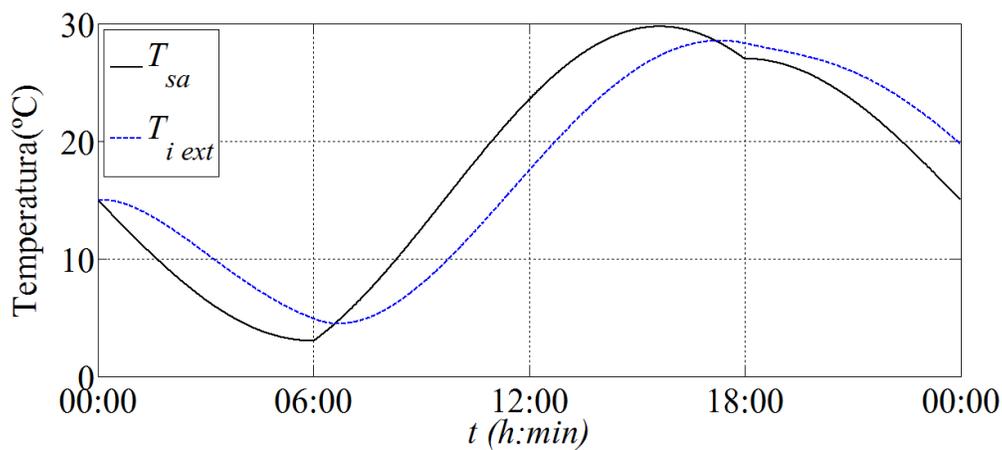


Figura 3.6 Comportamiento de T_{sa} y $T_{i ext}$.

La excitación interior e_i , incluyó a la radiación transmitida al interior τG_{pc} , y a la remoción de calor del interior del sistema Q_r . Se consideraron dos casos: 1) cuando la energía removida del interior del sistema es menor que la radiación que pasa de primera intención al interior del calorímetro ($\tau G_{pc} > Q_r$), 2) la remoción de calor desde el interior es mayor que la energía que se agrega por radiación ($\tau G_{pc} < Q_r$).

En las **Figuras 3.7** y **3.8** se muestra el comportamiento de la temperatura al interior debida a la excitación exterior $T_{i\ ext}$, y el comportamiento de la temperatura al interior debida a la excitación exterior e interior $T_{i\ int}$, para los *casos 1* y *2*, respectivamente. Cabe mencionar que en ambos casos se consideró la remoción de calor solo en la existencia de radiación solar.

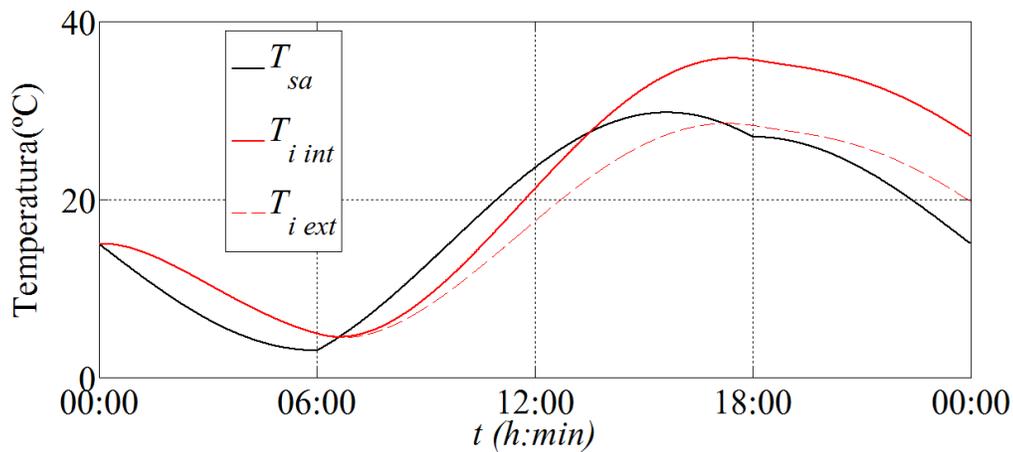


Figura 3.7 Temperaturas en el *Caso 1*.

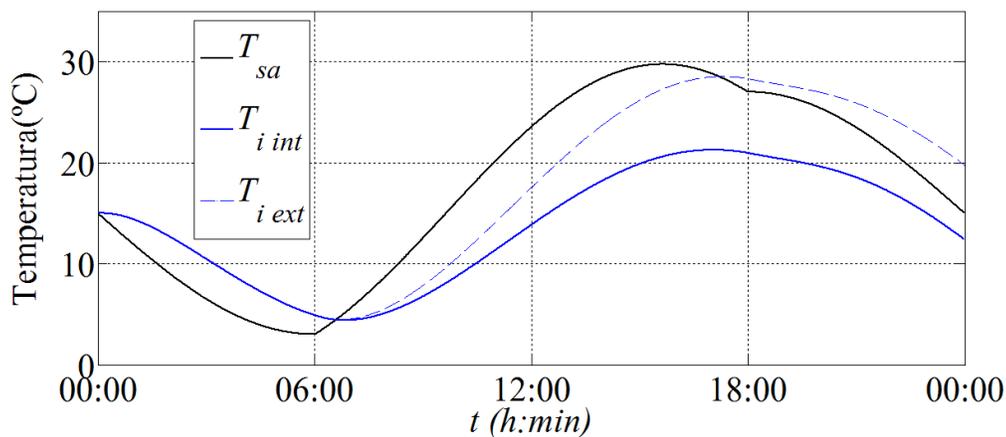


Figura 3.8 Temperaturas en el *Caso 2*.

En la **Figura 3.7** se observa que el nivel de $T_{i\ int}$ con relación a $T_{e\ ext}$ aumentó, lo que significa que se presentó un calentamiento en el interior debido a que la energía que se removió fue menor a la radiación que pasó de primera intención. En la **Figura 3.8** se observa el caso inverso, en el que se presentó un enfriamiento en el interior.

Identificación de la capacitancia térmica.

La identificación de la capacitancia térmica se realizó para ambos casos. En la **Tabla 3.4** se muestran los resultados de la identificación de la capacitancia térmica equivalente del vidrio, C_{vI} , y su desviación δ_C , con relación al valor teórico C_{vT} .

Tabla 3.4 Identificación de C_v (*Modelo 1*).

Identificaciones	CFT_{IMI} propuesto	CFT_{IMI} identificado	C_{vT} (kJ/°C)	C_{vI} (kJ/°C)	δ_C (%)
Calentamiento interior ($\tau G > Qr$)	2.54 e06	2.54 e06	11.25	11.25	0
Enfriamiento interior ($\tau G < Qr$)	2.54 e06	2.54 e06	11.25	11.25	0

En los resultados se observa que las identificaciones de C_{vI} se lograron sin desviaciones con relación a C_{vT} por lo que se puede observar que la metodología implementada en la *plataforma de identificación* en lo referente al *Modelo 1* funciona adecuadamente.

3.3.2 Funcionalidad del *Modelo 2*.

Funciones de transferencia.

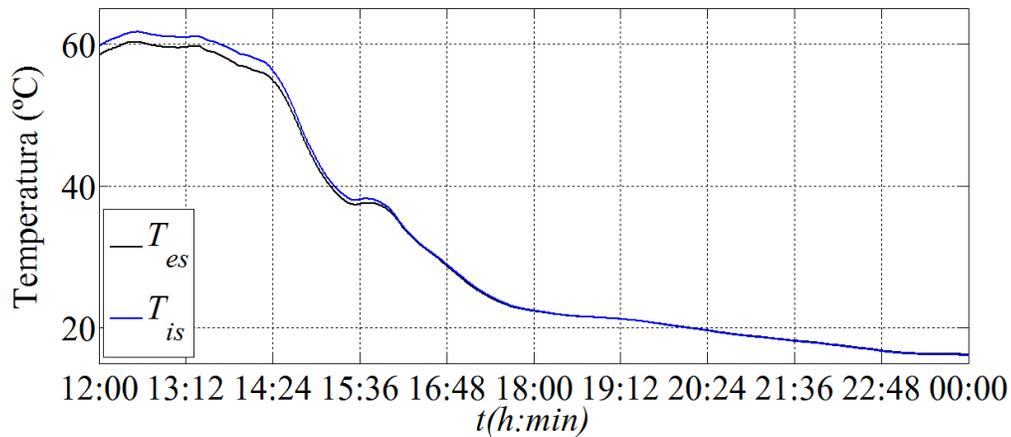
Para formular las funciones de transferencia para la verificación de la sección del *Modelo 2* se utilizaron los parámetros correspondientes al vidrio de referencia expresados en la **Tabla 3.1**. En la **Tabla 3.5** se muestran los parámetros del circuito RC para un análisis a nivel de la componente.

Tabla 3.5 Resistencias y Capacitancias (*Modelo 2*).

Parámetros	Magnitud	Unidades
$R_1 (L/2\lambda)$	0.00214	$m^2\text{C}/W$
$R_2 (L/2\lambda)$	0.00214	$m^2\text{C}/W$
$C_{vT} (\rho C_p V)$	11.25	kJ/C

Condiciones de prueba.

En la **Figura 3.9** se muestra el comportamiento de las temperaturas superficiales T_{es} y T_{is} utilizadas para la simulación del flujo de calor a través de la componente q_v . En la **Figura 3.10** se muestra al q_v simulado a partir de las funciones de transferencia.

**Figura 3.9** Temperaturas superficiales del vidriado.

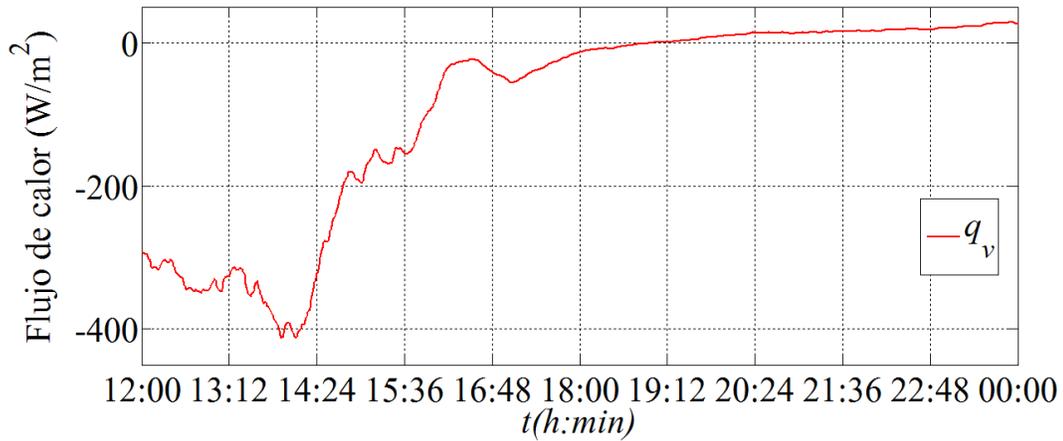


Figura 3.10 Flujo de calor a través de la componente.

Identificación de la capacitancia térmica.

El C_{vI} identificado fue de 11.25 kJ/°C con una δ_C de 0% con relación al valor teórico C_{vT} , por lo que la metodología implementada en la *plataforma de identificación* funciona adecuadamente.

Capítulo 4

Resultados.

En este capítulo se presentan los resultados de la identificación de la capacitancia térmica del vidriado de referencia que se obtuvieron con las pruebas experimentales en condiciones al exterior, con los dos modelos propuestos en este trabajo. Con relación al *Modelo 1*, se presentan los resultados de los coeficientes de transferencia de calor ajustados, la capacitancia interior ajustada, la capacitancia térmica del vidriado identificada y las desviaciones respecto al valor de referencia. Con relación al *Modelo 2* se presenta la capacitancia térmica identificada, su desviación respecto al valor de referencia y un comparativo del calor específico determinado respecto a lo reportado en la literatura.

4.1 Identificaciones con el análisis a nivel del sistema.

Como se explicó en la estrategia experimental, Sección 3.1.1, durante el proceso de identificación de la capacitancia térmica del vidriado con el *Modelo 1* (a nivel del sistema) se realizaron dos pruebas, la primera con un nivel de relación de masividad alta calorímetro-muestra vidriada y la segunda con menor relación.

4.1.1 *Modelo 1*: relación de masividad alta.

Condiciones de prueba.

La prueba experimental se realizó en Cuernavaca, Morelos, México (latitud $18^{\circ} 55'07''$, longitud $99^{\circ} 14' 03''$, altitud 1510 m sobre el nivel del mar), en horarios de 11-13:00 horas (tiempo solar) como se explicó en la Sección 3.1.1. En la **Figura 4.1** se presentan las historias de la radiación en el plano del calorímetro G_{pc} , la temperatura al ambiente al exterior T_e , y la temperatura al interior $T_{i\ real}$.

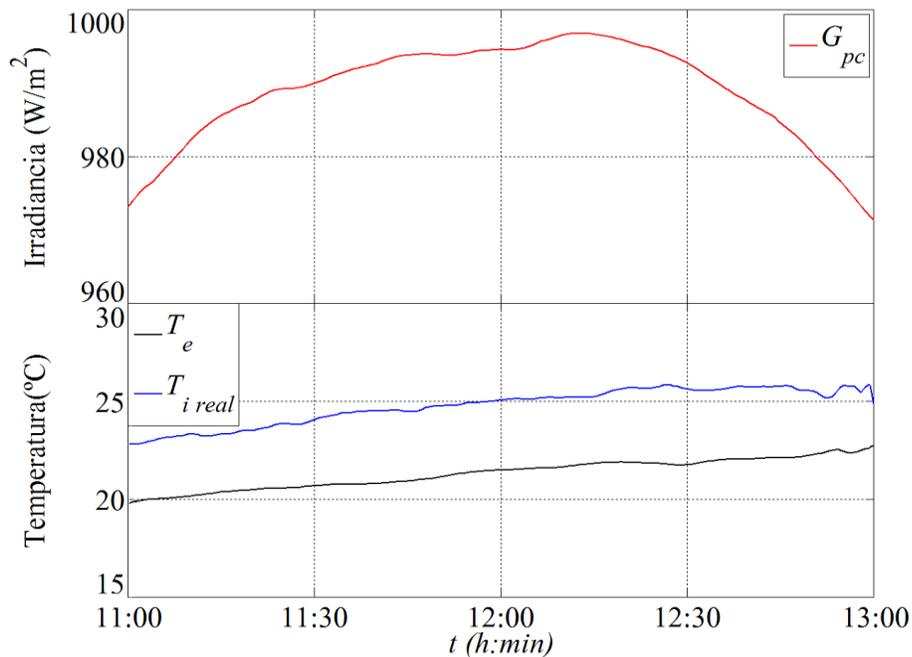


Figura 4.1 Condiciones ambientales durante la prueba.

Para la excitación e_i se consideró el flujo de calor que pasa a través del panel de montura para el vidriado Q_{pm} , las infiltraciones de calor a través de las paredes laterales Q_{pl} , las infiltraciones a través de la pared posterior del calorímetro Q_{pp} , la remoción de calor del interior del sistema Q_r , y la radiación transmitida de primera intención al interior τG_{pc} . En la **Figura 4.2** se muestran los flujos de calor en el interior con su incertidumbre los cuales se determinaron como reporta en su trabajo Macías-Melo (2013).

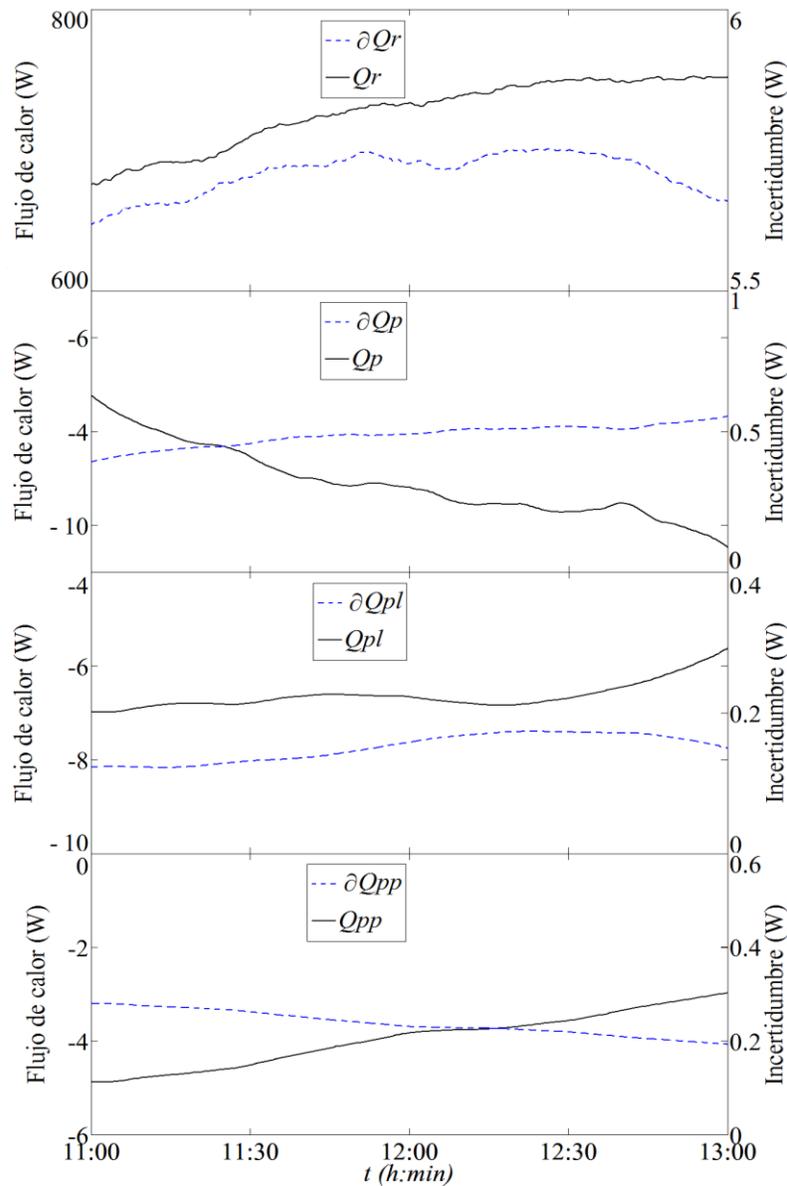


Figura 4.2 Flujos de calor al interior (—). Contribuciones de la incertidumbre en los flujos de calor (- - -).

Identificación de la capacitancia térmica.

Las gráficas de las tendencias de T_i en la obtención de h_e , h_i y C_i se muestran en el **Apéndice Ajuste de parámetros**. Los valores ajustados de los coeficientes de transferencia de calor h_e y h_i fueron de 18 y 8 W/m²°C, respectivamente. El valor de la capacitancia térmica equivalente al interior C_i , resultó de 90 kJ/°C, con lo que la relación de masividad calorímetro-muestra vidriada fue de 8. Con estos valores la T_i presentó su menor desviación promedio δ_T , con respecto a al comportamiento conocido experimentalmente (0.25°C). Es de resaltar que los valores ajustados de h_e y h_i coinciden con los reportados por Macías-Melo (2013) para pruebas al exterior con un vidriado de 6 mm en el período de 12:00-13:30 horas.

En la **Figura 4.3** se muestra el comportamiento de la temperatura interior obtenida a partir de mediciones experimentales $T_{i\ real}$, y la reproducida con las funciones de transferencia $T_{i\ sim}$.

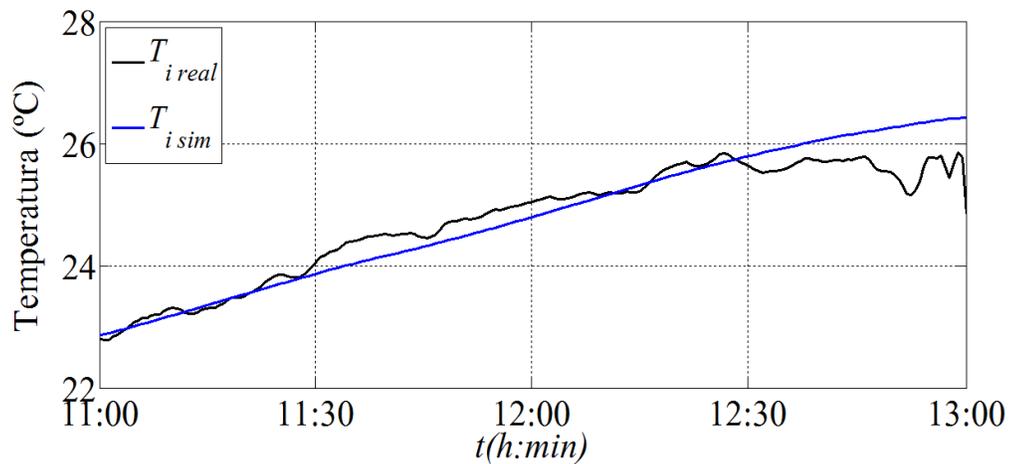


Figura 4.3 Comportamiento de T_i experimental con T_i simulada.

La capacitancia térmica identificada C_{vI} , fue de 1.68 kJ/°C con una desviación δ_C , del 85% con respecto a la capacitancia teórica C_{vT} (11.25 kJ/°C). En la **Figura 4.4** se muestra el comparativo del comportamiento de $T_{i\ sim}$ reproducida considerando a C_{vT} y considerando a C_{vI} . La δ_T del comportamiento reproducido considerando a C_{vI} fue de 0.27°C, 0.02°C más desviación que cuando se consideró a C_{vT} . Con lo anterior se puede observar que el valor del C_v fue poco determinante en la reproducción del comportamiento de T_i ; esto se debe a que la C_i ajustada es mucho mayor que el C_v del vidriado. En otras palabras, la relación de masividad

calorímetro-muestra de 8 es muy alta, por lo que el *Modelo 1* es más dependiente de la capacitancia interior.

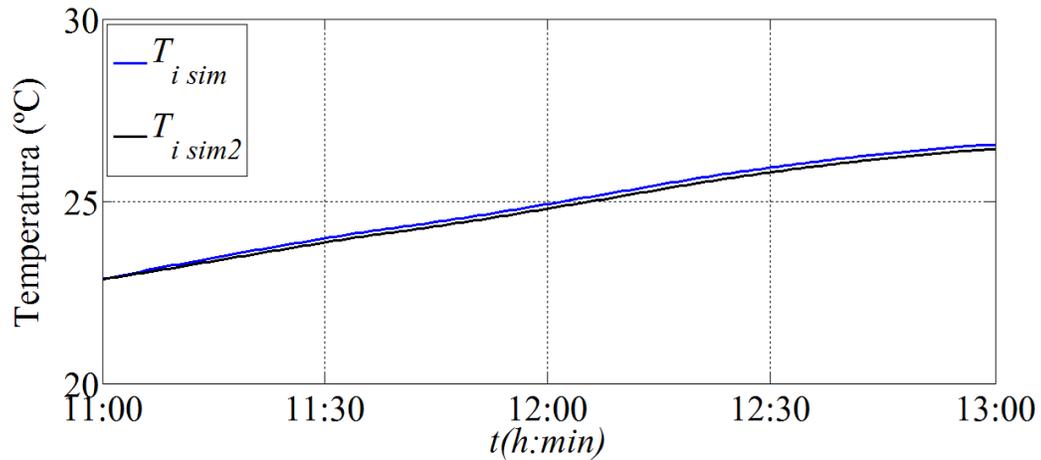


Figura 4.4 Comparativo de T_i 's simuladas con diferentes C_v 's.

4.1.2 Modelo 1: relación de masividad reducida.

Condiciones de prueba.

En la **Figura 4.5** se muestran las condiciones ambientales durante la prueba. La prueba experimental se desarrolló durante la noche de las 8:00 p.m. a 6:00 a.m., de tal forma que la radiación no influyera.

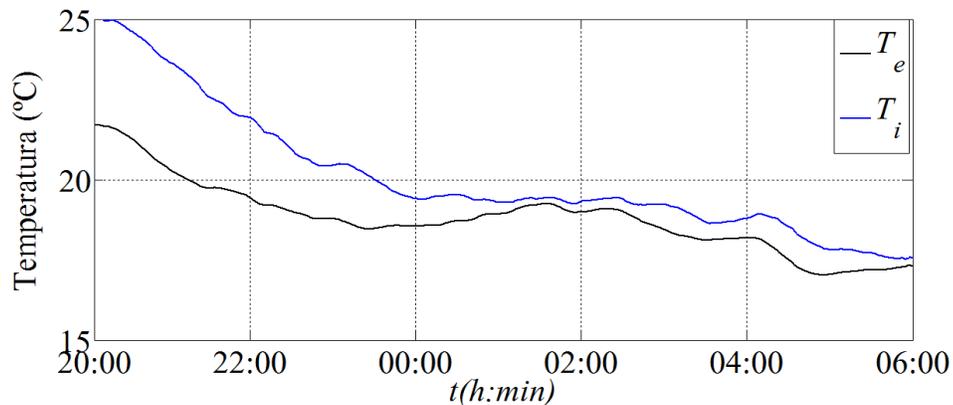


Figura 4.5 Condiciones ambientales durante la prueba.

Identificación de la capacitancia térmica.

Las gráficas de las tendencias de T_i en la obtención de h_e , h_i y C_i se muestran en el **Apéndice Ajuste de parámetros**. Para esta prueba los valores ajustados de los coeficientes de transferencia de calor h_e y h_i fueron de 17 y 8 W/m²°C, respectivamente. Como ya se mencionó anteriormente, la capacitancia equivalente al interior se modificó para esta prueba. De este modo, el valor de la capacitancia térmica equivalente al interior C_i , resultó de 35 kJ/°C, con lo que la relación de masividad calorímetro-muestra vidriada disminuyó a 3.11. Con estos valores la T_i presentó su menor desviación promedio δ_T , con respecto a al comportamiento conocido experimentalmente (0.19°C).

En la **Figura 4.6** se muestra el comportamiento de la temperatura interior obtenida a partir de mediciones experimentales $T_{i\ real}$, y la obtenida con las funciones de transferencia formuladas para esta prueba $T_{i\ sim}$. El comportamiento de T_i se reprodujo con una δ_T de 0.19°C.

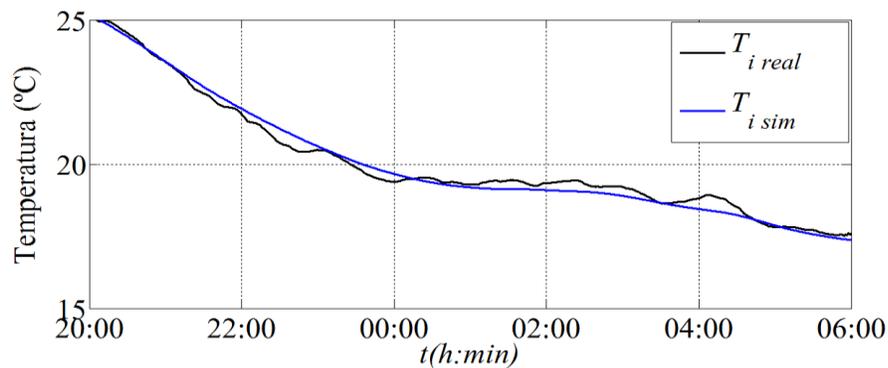


Figura 4.6 Comportamiento de T_i experimental y T_i simulada.

El C_{vI} para esta prueba fue de 3.44 kJ/°C con una δ_C del 69% con respecto a la capacitancia teórica C_{vT} (11.25 kJ/°C), 16% menor que la desviación con obtenido en la prueba donde se consideró relación de masividad elevada.

En general, al considerar los resultados de las identificaciones con el *Modelo 1*, con relación de masividad alta y relación de masividad reducida, se observó que el modelo reprodujo el comportamiento de T_i con una δ_T máximo de 0.27°C, y se identificó a la capacitancia con una δ_C mínimo del 69%. También, se observó que la relación de masividad calorímetro-muestra

vidriada disminuyó de 8 a 3.11, con lo que la desviación en la identificación del C_v disminuyó 16%. Lo anterior permite ver que el *Modelo 1* conlleva incertidumbres debidas a la masividad del equipo y a la característica lineal e invariante en el tiempo, ocasionando grandes desviaciones en las identificaciones. La desviación en la identificación del C_v puede reducirse si se cuenta con un sistema menos masivo y más pequeño, ya que las dimensiones del equipo experimental no solo influyen en la masividad; un equipo compacto permitiría que las temperaturas monitoreadas en el exterior y el interior sean más representativas del espacio en el que se consideran, ya que en el circuito RC se concentra a la masa del interior y la de la componente vidriada en un único punto.

4.2 Identificaciones con el análisis a nivel de la componente.

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el análisis a nivel de la componente (*Modelo 2*).

4.2.1 Condiciones de prueba.

La prueba experimental para la identificación de la capacitancia térmica del vidriado con el *Modelo 2*, se realizó a lo largo de cinco días. En la **Figura 4.7** se muestra la temperatura exterior superficial del vidriado T_{es} , la temperatura interior superficial del vidriado T_{is} y el flujo de calor a través del vidriado q_v . En la figura se señalan mediante recuadros negros los períodos de análisis seleccionados donde el comportamiento del flujo de calor es más estable y donde se puede considerar que se tiene un estado *cuasipermanente*, lo que es mayormente coincidente con el modelo invariante en el tiempo que se utiliza en este trabajo.

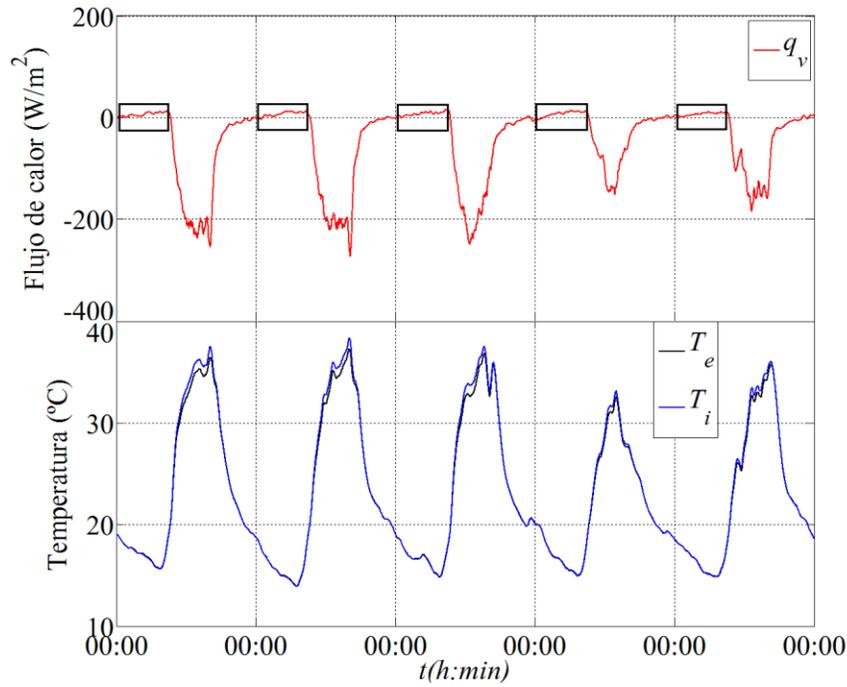


Figura 4.7 Temperaturas y flujo de calor en la componente vidriada durante la prueba.

4.2.2 Coeficientes de función de transferencia.

En la **Tabla 4.1** se muestra el valor de R_1 , R_2 , C_{vT} , CFT_{1M2} y CFT_{2M2} . Cabe mencionar que el CFT_{2M2} corresponde a la resistencia total del vidriado.

Tabla 4.1 Resistencias, Capacitancias y CFT'S (Modelo 2).

Parámetros	Magnitud	Unidades
$R_1 (L/2\lambda)$	0.00214	$m^2\text{°C/W}$
$R_2 (L/2\lambda)$	0.00214	$m^2\text{°C/W}$
$C_{vT} (\rho C_p V)$	11.25	kJ/°C
$CFT_{1M2} (C_v R_1 R_2)$	0.05165	$m^4\text{°C s/W}$
$CFT_{2M2} (R_1 + R_2)$	0.004285	$m^2\text{°C/W}$

4.2.3 Identificación de la capacitancia térmica.

En la **Figura 4.8**, lado izquierdo, se muestra el comportamiento del flujo real de calor total a través de la componente vidriada, para cada una de las cinco noches ($q_{vN1\ real}$, $q_{vN2\ real}$, $q_{vN3\ real}$, $q_{vN4\ real}$ y $q_{vN5\ real}$), y el comportamiento del flujo de calor total obtenido con las funciones de transferencia ($q_{vN1\ sim}$, $q_{vN2\ sim}$, $q_{vN3\ sim}$, $q_{vN4\ sim}$ y $q_{vN5\ sim}$) para cada una de las cinco noches. Del lado derecho de la **Figura 4.8** se muestra un acercamiento en una sección aleatoria de cada una de las reproducciones.

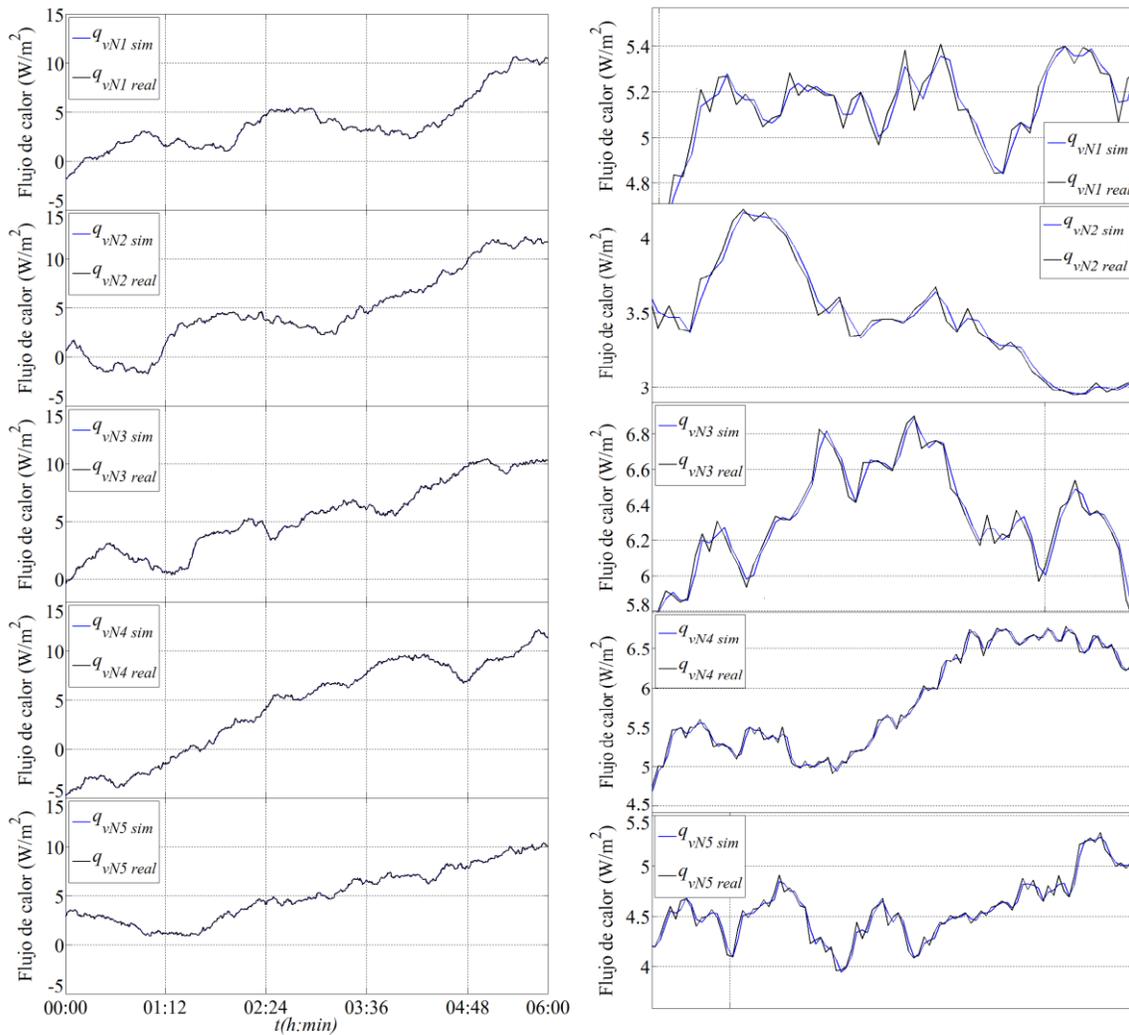


Figura 4.8 Flujo de calor en la componente vidriada por períodos.

Las reproducciones del flujo de calor q_v se lograron con un δ_q de 0.006 W. En la **Tabla 4.2** se muestra los CFT 'S identificados, los C_v 's determinados, las desviaciones δ_q y δ_c obtenidas y los C_p 's determinados, para cada una de las noches consideradas. El C_v se identificó con un valor promedio de 11.02 kJ/°C y una δ_c máxima del 4.3% con relación a los valores de referencia. El valor promedio del C_p determinado de las capacitancias identificadas en esta prueba fue de 0.73 kJ/kg°C con una desviación de 2.08% con relación al C_p de referencia (0.75 kJ/kg°C). En la **Tabla 4.1** se observó que el CFT_{2M2} es la suma de la resistencia térmica total de la componente con un valor de 0.004285 m²°C/W, y que en estas pruebas el CFT_{2M2} identificado fue en promedio de 0.004272 m²°C/W. Con lo anterior, se observa que el modelo permite identificar también a la conductividad térmica del material con una desviación de 0.3%.

Tabla 4.2 Identificaciones de C_v (*Modelo 2*).

Prueba (C_p Identificado) (kJ/kg°C)	δ_q (W)	CFT_{1M2} (m ⁴ °Cs/W)	CFT_{2M2} (m ² °C/W)	C_v (kJ/°C)	δ_C (%)
Noche 1 (0.73)	0.004	0.05054	0.004284	11.00	2.1
Noche 2 (0.76)	0.005	0.0525	0.004295	11.43	1.6
Noche 3 (0.73)	0.005	0.0509	0.0042	11.08	1.4
Noche 4 (0.72)	0.006	0.04968	0.004297	10.82	3.8
Noche 5 (0.71)	0.005	0.04943	0.004288	10.76	4.3

4.2.4 Comparación con trabajos previos.

En la **Figura 4.13** se muestra un comparativo de los valores del C_p reportados en la literatura, y el determinado en el presente trabajo. Los valores reportados de C_p en su mayoría están dentro del intervalo de 0.70 a 0.80 kJ/kg°C, a diferencia del de Asan (2006) que lo reporta en poco menos del doble que la mayoría. Considerando los valores reportados en el intervalo de 0.70 a 0.80 kJ, se tiene el valor medio de 0.74 kJ/°C que es mayormente concordante con lo

que se reporta en este trabajo y lo reportado por Álvarez (1994). El C_p calculado en este trabajo tiene una desviación del 1.3% con relación al valor medio reportado en la literatura. Cabe mencionar que los valores reportados en la literatura corresponden a valores obtenidos con metodologías para estado permanente.

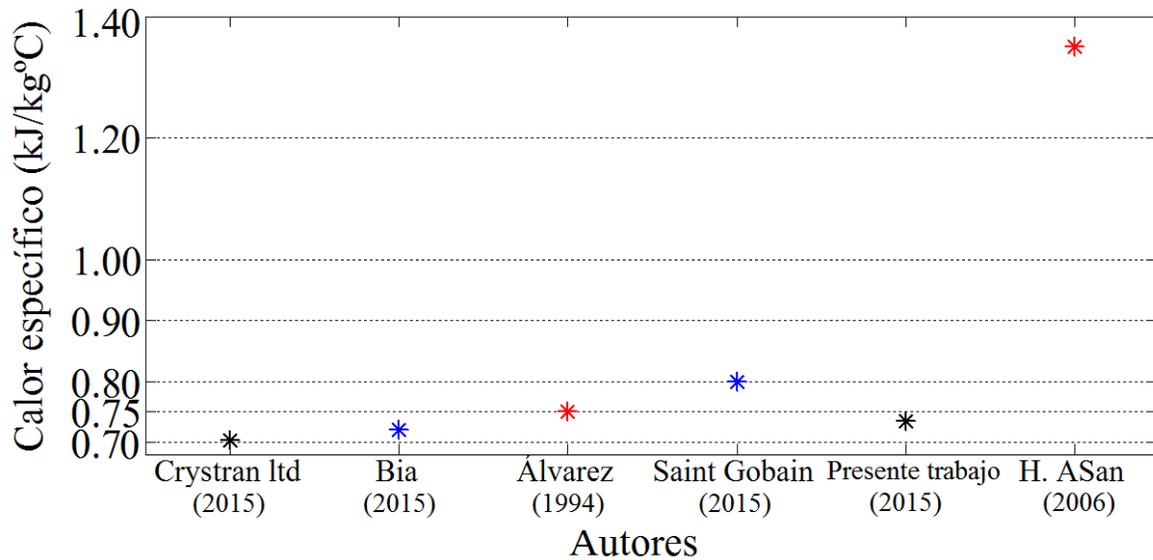


Figura 4.9 Comparativo del C_p .

Los resultados obtenidos con el análisis a nivel de la componente muestran que el *Modelo 2* permite realizar identificaciones del C_v con menor incertidumbre que el *Modelo 1*. Lo anterior se debe en gran medida a la cantidad de fuentes de incertidumbre que conlleva cada modelo. Mientras que el *Modelo 1* involucra a h_e , h_i y C_i como parámetros de ajuste el *Modelo 2* no tienen ningún parámetro de ajuste. El *Modelo 2* tiene la desventaja de requerir previamente el valor de la conductividad del material, mientras que el *Modelo 1* se basa más en el conocimiento de las variables involucradas con el sistema y no con la muestra a evaluar.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

En este capítulo, se presentan las conclusiones de este proyecto de tesis y las recomendaciones para trabajos futuros

5.1 Conclusiones.

1. En este trabajo se identificó a la capacitancia térmica equivalente C_v , de un vidriado con dos modelos RC. Con el *Modelo 1* se obtuvieron reproducciones del comportamiento de la temperatura interior T_i con una desviación promedio máxima de 0.27°C con relación a su comportamiento real y se identificó un C_v de $3.44 \text{ kJ}/^\circ\text{C}$ con una desviación de 69% con respecto a los valores de referencia. Con el *Modelo 2* se obtuvieron reproducciones del flujo de calor a través de la componente vidriada q_v , con una desviación promedio de 0.006 W con respecto a su comportamiento real, con lo que se identificó un C_v promedio de $11.02 \text{ kJ}/^\circ\text{C}$ con una desviación máxima de 4.3% con relación a los valores de referencia.
2. La confiabilidad de la funcionalidad de la *plataforma de identificación* desarrollada en este trabajo también se confirmó con identificaciones del C_v a partir de datos propuestos. En las identificaciones no se produjo error con relación a los valores propuestos.
3. El *Modelo 1* se aplicó con dos relaciones de masividad calorímetro-muestra vidriada. La relación de masividad fue de 8 a 3.11 lo que produjo que la desviación en la identificación se redujera de 81% a 69%.
4. La desviación en la identificación del C_v con el *Modelo 1* puede reducirse si se cuenta con un sistema menos masivo y más pequeño, ya que las dimensiones del equipo experimental no solo influyen en la masividad; un equipo compacto permitiría que las temperaturas monitoreadas en el exterior y el interior sean más representativas del espacio en el que se consideran, ya que en el circuito RC se concentra a la masa del interior y la de la componente vidriada en un único punto.
5. El *Modelo 1* para la identificación del C_v conlleva incertidumbres debidas a la característica lineal e invariante en el tiempo del modelo, a la relación de masividad calorímetro-muestra y a las temperaturas en el exterior y en el interior que pueden no ser representativas del espacio en el que se consideran. Aún así, puede ser una alternativa más factible para la determinación de la capacitancia térmica de vidriados, si se utiliza un equipo más pequeño y se elimina el ajuste de h_e , h_i y C_i . Lo anterior, debido a que en su desarrollo no involucra el conocimiento de las propiedades termofísicas del vidriado de manera previa.

6. Con el *Modelo 2* se lograron identificaciones del C_v , C_p y λ , con desviaciones respecto a los valores de referencia de 4.3%, 2.08% y 0.3% respectivamente.
7. El *Modelo 2* conlleva menor incertidumbre por involucrar menor número de variables, al requerir únicamente las temperaturas superficiales y la conductividad del material. Por lo que es más conveniente su aplicación si se conoce previamente la conductividad térmica.

5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.

Para trabajos futuros de identificación de la capacitancia térmica de vidriados se recomienda la aplicación del *Modelo 1* debido a que para su aplicación no se necesita conocer las propiedades termofísicas del vidriado. Sin embargo, es importante afinar detalles como:

- 1) Considerar en el modelado la no linealidad y la variación de sus parámetros en el tiempo.
- 2) Realizar un estudio de perturbaciones para determinar la relación de masividad sistema-muestra óptima para identificar la capacitancia térmica con menor incertidumbre.
- 3) Disponer el equipo experimental en cámaras de ambiente controlado, con el fin de reducir las aportaciones de incertidumbre de la temperatura exterior e interior.
- 4) Por otro lado, en el caso de que se utilice el *Modelo 2* se recomienda adaptar el equipo para que se pueda determinar el flujo de calor a través del vidriado, sin que sea necesario conocer la conductividad del mismo.

Bibliografía.

1. Álvarez G., 1994, Transferencia de calor en una cavidad con interacción térmica a través de una cara semitransparente con control óptico, Tesis Doctoral, Facultad de ingeniería-UNAM, D.F., México.
2. ASTM Norma C1114, *Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Thin-Heater Apparatus*, American Society for Testing Materials, 2000.
3. ASTM Norma C1363, *Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus*, American Society for Testing Materials, 2005.
4. Asan H., 2006, Numerical computation of time lags and decrement factors for different buildings materials, *Building and Environment*, 41: 615–620.
5. Asan H., Sancaktar Y.S., 1998, Effects of Wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor, *Energy and Buildings*, 28: 159–166.
6. ASHRAE Handbook of Fundamentals, Atlanta, GA. (Cap. 31), 2005.
7. Baker P.H., Van Dijk H. A. L., 2008, PASLINK and dynamic outdoor testing of building components, *Building and Environment*, 43: 143–151.
8. Balaras C. A., 1996, The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods, *Energy and Buildings*, 24:1–10.
9. BIA, Los Cristales del Mundo, Composición y Características Generales, 2014 BIA-aRT_dEPT& targetiTonline™, Montevideo, República Oriental del Uruguay. Subido 2014. Visitado en Enero 23, 2015, 15:00hr.
URL:<http://www.bia.com.uy/index.php/composicion-y-caracteristicas-generales>.
10. CRYSTRAN, UV-IR-SPECIALIST OPTICS, Silica Glass (SiO₂), Crystran Ltd. 2012 – Mediatopia, Subido 2012. Visitado en Enero 23, 2015, 16:00 hr.
URL:<http://www.crystran.co.uk/optical-materials/silica-glass-sio2>
11. Harrison S. J., Collins M.R., 1999, Queen's University solar calorimeter – design, calibration, and operating procedure, Presented at Solar Energy Society of Canada, Montreal, Canadá.
12. Ghiaus C., Hazyuk I., 2010, Calculation of optimal thermal load of intermittently heated building, *Energy and Buildings*, 42: 1248–1258.
13. Gill P.S., Moghadam T.T., Ranjbar B., 2010, Differential Scanning Calorimetry Techniques: Applications in Biology and Nanoscience, *Journal of Biomolecular Techniques*, 21: 167–193.
14. Gutschker O., 2010, Parameter identification with the software package LORD, *Building and Environment*, 43: 163–169.

15. Holman J.P., *Heat transfer*, McGraw-Hill higher education, Ninth edition, New York, 2002.
16. Incropera F. P., David P., *Fundamentals of heat and mass transfer*, Pearson, Fifth edition, 2002.
17. ISO 8990: (E), *Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box*, International Organization for Standardization, First edition 1994-09-01, 1994.
18. ISO 10292, *Glass in building – Calculation on steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing*, International Organization for Standardization, First edition 1994-07-15, 1994.
19. ISO 11357: (E), *Plastics— Differential scanning calorimetry (DSC) — Part 4: Determination of specific heat capacity*, International Organization for Standardization, First edition, 2005.
20. ISO 13786, *Thermal performance of building components – Dynamic thermal characteristics – Calculation methods*, International Organization for Standardization, 2007.
21. Jiménez M.J., Madsen H., 2008, Models for describing the thermal characteristics of building components, *Building and Environment*, 43: 152–162.
22. Jiménez M.J., Madsen H., Andersen K.K., 2008a, Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB, *Building and Environment*, 43: 170–180.
23. Jiménez M.J., Porcar B., Heras M.R., 2008b, Estimation of building component UA and gA from outdoor test in warm and moderate weather conditions, *Solar Energy*, 82: 573–587.
24. Jiménez M.J., Porcar B., Heras M.R., 2009, Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value, *Building and Environment*, 44: 361–367.
25. Kreith F., Bohn M. S., *Principios de transferencia de calor*, ED Thompson, Segunda Edición, México, 2001.
26. Macías-Melo E.V., 2013, Evaluación Térmica Transitoria de Componentes de Edificaciones Mediante Pruebas al Exterior Variando los Coeficientes Convectivos, Tesis Doctoral, Cenidet-SEP, Cuernavaca, Morelos, México.
27. Macías-Melo E.V., Flores-Prieto J.J., 2013, Solar calorimeter for thermal testing of glazings, *Journal Heat Transfer Research*.
28. Morayta A., 2012, Determinación de la Conductividad Térmica de un Sólido por Medio de un Método Inverso de Transferencia de Calor, Tesis de maestría, cenidet-SEP, Cuernavaca, Morelos.
29. Market Wired, Search, Marketwired L.P.-sysomos, UK, subido 2008, Visitado en Febrero 26, 2014, 12:22 hr.

- URL:<http://www.marketwired.com/press-release/high-growth-reported-for-the-world-flat-glass-market-906827.htm>
30. NFRC 201, *Procedure for Interim Standard Test Method for Measuring the Solar Heat Gain Coefficient of Fenestration Systems Using Calorimetry Hot Box Methods*, National Fenestration Rating Council Incorporated, 2010.
 31. NFRC 300, *Test Method for Determining the Solar Optical Properties of Glazing Materials and Systems*, National Fenestration Rating Council Incorporated, 2004.
 32. NOM-008-ENER: *Eficiencia energética en edificaciones, envolventes de edificios no residenciales*, Norma Oficial Mexicana, Diario Oficial, México, 2001.
 33. NOM-018-ENER: *Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba*, Norma Oficial Mexicana, Diario Oficial, México, 1997.
 34. NOM-020-ENER: *Eficiencia energética en edificaciones.-Envolvente de edificios para uso habitacional*, Norma Oficial Mexicana, Diario Oficial, México, 2012.
 35. NOM-024-ENER: *Características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidriados para edificaciones. Etiquetado y métodos de prueba*, Norma Oficial Mexicana, Diario Oficial, México, 2012.
 36. Ogata K., *Dinámica de sistemas*, Prentice Hall, Primera edición, México, 1987.
 37. Ogata K., *Sistemas de control en tiempo discreto*, Pearson Educación, Segunda Edición, México, 1996.
 38. Prívará S., Cigler J., Vána Z., Oldewurtelb F., Sagerschnigc C., Záceková E., 2013, Building modeling as a crucial part for building predictive control, *Energy and Buildings*, 56: 8–22.
 39. SAINT-GOBAIN, SEKURIT, Introducción del vidrio, SAINT GOBAIN SEKURIT – Bussines Lab, Thourotte, Francia. Visitado en Febrero 14, 2015, 08:00hr. URL: <http://www.saint-gobain-sekurit.com/es/glazingcatalogue/propiedades-del-vidrio>

Apéndice

Ajuste de parámetros.

Apéndice: Ajustes de parámetros.

En este apéndice se presenta el ajuste que se realizó de los coeficientes de transferencia de calor h_e y h_i , y de la capacitancia térmica equivalente interior del sistema C_i . El ajuste de estos parámetros se utiliza para la aplicación del *Modelo 1* considerando la relación masividad calorímetro-muestra vidriada alta y la relación de masividad calorímetro-muestra vidriada reducida.

Relación de masividad calorímetro-muestra vidriada alta.

Aplicando el procedimiento descrito en la Sección 3.1.1, considerando fijo h_i en $8 \text{ W/m}^2\text{C}$ y variando el valor de h_e para diferentes valores de C_i , se obtuvo una gráfica para cada valor de C_i (21 gráficas). En la **Figura A.1** se muestran cuatro gráficas de las reproducciones, donde se muestra la tendencia del valor de T_i reproducido respecto al T_i experimental. En las diferentes figuras se puede ver de manera cualitativa el grado de ajuste que se puede lograr para cada C_i , para el C_i de $50 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$ la disparidad fue mayor que cuando se utilizó un valor de C_i de $90 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$.

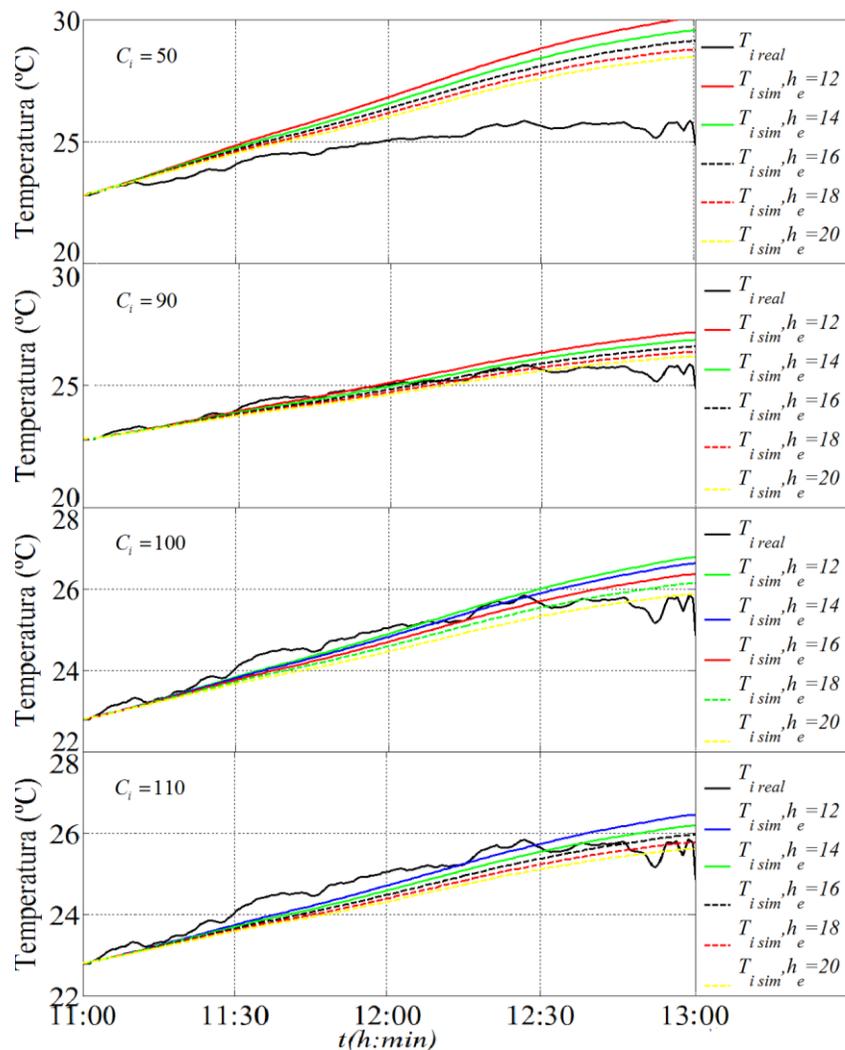


Figura A.1 Reproducciones para el ajuste de h_e , h_i y C_i para la relación de masividad alta.

En la **Tabla A.1** se muestran las desviaciones promedio δ_T , obtenidas para cada uno de los valores supuestos de C_i , y el h_e . La δ_T mínima fue de 0.252°C , como se resalta en la Tabla. Por lo anterior, los valores considerados para realizar la identificación de la capacitancia térmica del vidriado con una relación de masividad alta se ajustaron en una C_i de $90 \text{ kJ}/^\circ\text{C}$, un h_e de $18 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$ y un h_i de $8 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$.

Tabla A.1 Ajuste de h_e y C_i para la relación de masividad alta.

C_i (kJ/°C)	δ_T (°C)	h_e (W/m ² °C)
50	1.810	20
55	0.893	20
60	0.758	20
65	0.684	20
70	0.602	20
75	0.337	20
80	0.272	20
85	0.254	19
90	0.252	18
95	0.253	17
100	0.287	15
105	0.255	15
110	0.274	13
115	0.279	12
120	0.289	12
125	0.305	12
130	0.335	12
135	0.370	12
140	0.406	12
145	0.474	12
150	0.542	12

Relación de masividad calorímetro-muestra vidriada reducida.

Para el ajuste de parámetros con la relación de masividad calorímetro-muestra vidriada reducida, se considera fijo h_i en 8 W/m²°C y se varía el valor de h_e de 12 a 20 W/m²°C en 1 W/m²°C, para diferentes valores de C_i . El ajuste de C_i comienza en el valor ajustado para la relación de masividad alta (90 kJ/°C) y desciende en 5 kJ/°C, debido a que al retirar elementos del interior la masividad del calorímetro lógicamente disminuirá. Se obtuvo una gráfica para cada valor de C_i (15 gráficas). En la **Figura A.2** se muestran cuatro gráficas de las reproducciones, donde se muestra la tendencia del valor de T_i reproducido respecto al T_i experimental. En las diferentes figuras se puede ver de manera cualitativa el grado de ajuste que se puede lograr para cada C_i , para el C_i de 90 kJ/°C la disparidad fue mayor que cuando se utilizó un valor de C_i de 35 kJ/°C.

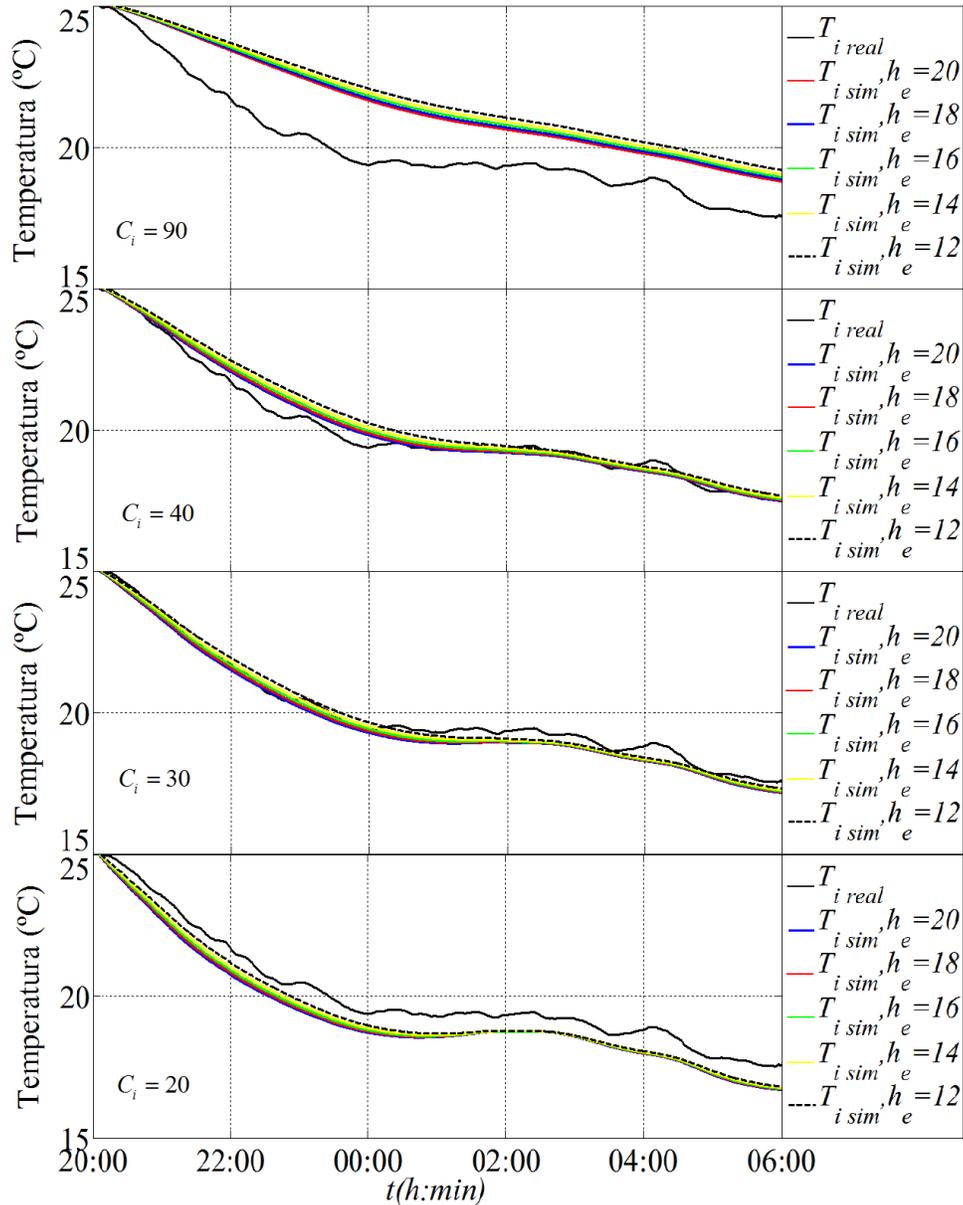


Figura A.2 Reproducciones para el ajuste de h_e , h_i y C_i para la relación de masividad reducida.

En la **Tabla A.2** se muestran las desviaciones promedio δ_T , obtenidas para cada uno de los valores supuestos de C_i , y el h_e . La δ_T mínima fue de 0.195°C, como se remarca en color rojo en la Tabla. Por lo anterior, los valores considerados para realizar la identificación de la

capacitancia térmica del vidriado con una relación de masividad reducida se ajustaron en una C_i de 35 kJ/°C, un h_e de 17 W/m²°C y un h_i de 8 W/m²°C.

Tabla A.2 Ajuste de h_e y C_i para la relación de masividad reducida.

C_i (kJ/°C)	δ_T (°C)	h_e (W/m ² °C)
20	0.529	12
25	0.298	12
30	0.215	12
35	0.195	17
40	0.202	20
45	0.284	20
50	0.404	20
55	0.542	20
60	0.687	20
65	0.816	20
70	0.944	20
75	1.062	20
80	1.118	20
85	1.292	20
90	1.396	20