

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Mecánica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Identificación de Parámetros de Envolventes Mediante Pruebas al
Interior en Estado Transitorio**

presentada por

Ing. Víctor Eduardo Domínguez Ramírez

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

Director de tesis
Dr. José Jassón Flores Prieto

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

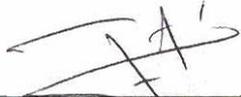
Cuernavaca, mor., 26 de mayo de 2015

OFICIO No. DIM/106/2015
Asunto: Aceptación de documento de tesis

C. DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

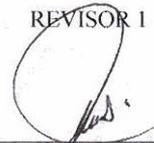
Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Ing. Victor Eduardo Domínguez Ramírez, con número de control M13CE014, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Identificación de parámetros de envoltentes mediante pruebas al interior 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



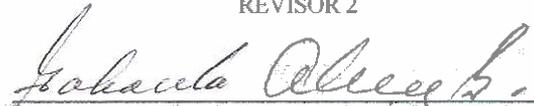
DR. JOSÉ JASSÓN FLORES PRIETO
Doctor en Ingeniería
4355408

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

SE
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
DESARROLLO TECNOLÓGICO
RECIBIDO
01 JUN 2015
Servicios Escolares

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

Cuernavaca, Mor., 02 de junio de 2015
OFICIO No. SAC/125/2015

Asunto: Autorización de impresión de tesis

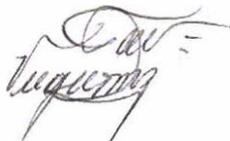
ING. VÍCTOR EDUARDO DOMÍNGUEZ RAMÍREZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "**Identificación de parámetros de envoltentes mediante pruebas al interior 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
TECNOLOGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

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

GVGR/mcr

Dedicatorias

A dios por darme la fortaleza para seguir adelante.

A mis padres, Manuelita del Carmen Ramírez Ventura y Víctor Romeo Domínguez Mijangos, por todas las enseñanzas que me dieron, por nunca dejarme caer y sufrir en momentos difíciles, siempre están en mi corazón y en cada paso que doy en mi vida. Este logro lo dedico a ustedes, y sé que esta frase será para toda la vida “Siempre contigo”.

A mi hermana Daniela Domínguez por compartir bellos momentos, por estar a mi lado a pesar de la distancia y por animarme a seguir adelante. Te amo Danielita.

A Delia Ventura y Beyter Beyin por todos sus consejos, por los bellos momentos, por impulsarme a seguir adelante y porque siguen siendo parte de este mundo y siempre están en mi corazón.

Agradecimientos

Al Dr. José Jassón Flores Prieto por creer y confiar en mí para llevar a cabo este proyecto. Tal vez no tenga todas las palabras para agradecerle todo el apoyo que brindó, pero si puedo describirlo con estas “Dedicación, Amistad y Humildad” y esta frase que en lo personal lo caracteriza “No puedo enseñar nada a nadie, solo puedo hacerles pensar”.

Al mi comité revisor, Dra. Gabriela del Socorro Álvarez García, Dr. Efraín Sima Moo, Dr. Jesús Arce Landa, gracias por sus comentarios y críticas para mejorar la calidad de mi trabajo, y sin duda alguna por la amistad y apoyo durante mi estancia. En general, a todos mis profesores por sus enseñanzas y por sus buenas cátedras que contribuyeron a mi desarrollo académico.

A los Doctores Carlos Daniel, Carlos Astorga, Juan Reyes, Víctor Alvarado y Fabricio Escobar, profesores del Departamento de Electrónica, por su apoyo durante esta estancia.

A mi novia Yuridia Loya por brindarme todo su apoyo para culminar esta etapa, por comprenderme, amarme y nunca dejarme caer en momentos difíciles, gracias por llenar de felicidad esta etapa de mi vida.

Al Dr. Carlos Ríos por impulsarme a seguir adelante, buscar nuevas experiencias y sin duda alguna por su valiosa amistad.

A mis compañeros del área de mecánica y electrónica por los buenos momentos, los mejores convivios y por ser parte de esta etapa de mi vida.

A Armando León, Leopoldo Dávila y Guillermo Gutiérrez, a quienes más que amigos los considero mis hermanos, muchas gracias por todo.

A toda la familia Ramírez por nunca dejarme solo y estar cuando más los necesite.

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.

Al Departamento de Servicios Escolares por su amable atención durante mi estancia y al Dr. Abúndez Pliego y Rocío Salazar por el apoyo en los trámites necesarios para culminar esta etapa.

Índice

	Pág.
Lista de Figuras.	iii
Lista de Tablas.	v
Nomenclatura.	vi
Resumen.	viii
Abstract.	ix
	Pág.
CAPÍTULO 1. Introducción.	
1.1 Generalidades.	2
1.2 Revisión bibliográfica.	4
1.2.1 Estudios teóricos basados en modelos RC.	4
1.2.2 Estudios teóricos basados en programas de simulación.	6
1.2.3 Estudios experimentales.	11
1.2.4 Estandarización de procesos térmicos.	15
1.3 Conclusión de la revisión bibliográfica.	16
1.4 Objetivos y alcances.	17
1.4.1 Objetivo general.	17
1.4.2 Objetivos particulares.	17
1.4.3 Alcances.	17
1.5 Descripción de capítulos.	18
CAPÍTULO 2. Modelos.	
2.1 Mecanismos de transferencia de calor.	20
2.1.1 Conducción.	20
2.1.2 Convección.	21
2.1.3 Radiación.	21
2.2 Funciones de transferencia.	22

2.3 Modelo físico.	24
2.3 Modelo matemático.	25
2.4.1 Modelo RC tiempo continuo.	26
2.4.2 Modelo RC tiempo discreto.	28
2.4.3 Verificación teórica del modelo.	29
CAPÍTULO 3. Diseño experimental.	
3.1 Muestreo.	34
3.2 Modelo experimental.	35
3.3 Metodología experimental.	36
3.4 Equipo experimental.	38
CAPÍTULO 4. Resultados.	
4.1 Determinación de condiciones de muestreo.	44
4.2 Determinación de λ_f y Cp_f equivalentes.	47
4.3 Comparación del Cp_f y λ_f con trabajos previos.	57
4.3.1 Calor específico equivalente.	58
4.3.2 Conductividad térmica equivalente.	58
CAPÍTULO 5. Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.	
5.1 Conclusiones.	61
5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.	62
Bibliografía.	63
Apéndice A. Calibración de sensores.	67
Apéndice B. Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor.	70

Lista de figuras

Figura	Descripción	Página
2.1	Flujo de calor por conducción.	20
2.2	Flujo de calor por convección.	21
2.3	Flujo de calor por radiación.	22
2.4	Circuito RC.	23
2.5	Modelo Físico.	25
2.6	Modelo en términos de circuitos térmicos.	26
2.7	Verificación de coeficientes de función de transferencia.	29
2.8a	Simulación en Matlab.	31
2.8b	Simulación en Ident.	31
3.1a	Cavidad de foamular®.	34
3.1b	Muestras de las masas al interior.	34
3.2	Modelo experimental.	36
3.3	Procedimiento experimental.	38
3.4	Equipo experimental.	39
3.5	Componentes del equipo experimental.	40
3.6	Puesta en marcha del equipo experimental.	40
3.7	Instrumentación de las termopilas.	41
3.8	Distribución de puntas de las termopilas a lo largo y ancho de la pared.	42
4.1	Comportamiento de T_e y T_i en el primer experimento.	44
4.2	Comportamiento de h_e y h_i .	45
4.3a	Comportamiento de T_e y T_i en el segundo experimento.	46
4.3b	Comportamiento de T_e y T_i en el tercer experimento.	46
4.4a	Ajuste de la temperatura experimental al interior y la temperatura al	48

	interior obtenida a partir de las funciones de transferencia para la prueba de la uno a la tres.	
4.4b	Ajuste de la temperatura experimental al interior y la temperatura al interior obtenida a partir de las funciones de transferencia para la prueba de la cuatro a la siete.	49
4.5	Comportamiento de T_e y T_i en el cuarto experimento.	51
4.6	Ajuste de la temperatura experimental al interior y la temperatura al interior obtenida a partir de las funciones de transferencia para el cuarto experimento.	52
4.7	Comportamiento de T_e y T_i en el quinto experimento.	54
4.8	Ajuste de la temperatura experimental al interior y la temperatura al interior obtenida a partir de las funciones de transferencia para el quinto experimento.	55
4.9	Comparativo del Cp_f considerando la influencia de masa al interior.	57
4.10	Comparativo del Cp_f con trabajos previos.	58
4.11	Comparativo de λ_f con trabajos previos.	59

Lista de Tablas

Tabla	Descripción	Página
2.1	Equivalencias de circuitos.	24
2.2	Parámetros utilizados en la simulación.	30
2.3	Comparación de los coeficientes de función de transferencia mediante Matlab e Ident.	31
2.4	Desviación de los coeficientes de función de transferencia.	31
2.5	Valores de C_{pf} a partir de los coeficientes de función de transferencia.	32
3.1	Ecuaciones para determinar $T_{pm}(t)$, $T_i(t)$, $T_e(t)$, $T_{pi}(t)$ y $T_{pe}(t)$.	42
4.1	Conductividad térmica equivalente para el primer, segundo y tercer experimento.	47
4.2	Calor específico equivalente considerando la cavidad vacía.	50
4.3	Conductividad térmica equivalente para el cuarto experimento.	52
4.4	Calor específico equivalente considerando 1.3 kg al interior de la cavidad.	53
4.5	Conductividad térmica equivalente para el quinto experimento.	54
4.6	Calor específico equivalente considerando 0.5 kg al interior al interior de la cavidad.	56

Nomenclatura

Variables	Descripción	Unidades
C	Capacitancia eléctrica	C/V
C_1	Capacitancia térmica de la muestra	J/°C
C_2	Capacitancia térmica al interior de la muestra	J/°C
CFT_1	Coefficiente de función de transferencia	Variable
CFT_2	Coefficiente de función de transferencia	Variable
C_p	Calor específico	J/kg°C
h	Coefficiente de transferencia de calor	W/m ² °C
I	Corriente eléctrica	A
L	Longitud	m
m	Masa	kg
Q	Flujo de calor	W
q_1	Flujo de calor a través de la muestra por unidad de área	W/m ²
q_2	Flujo de calor almacenado en la muestra por unidad de área	W/m ²
q_3	Flujo de calor al interior de la muestra por unidad de área	W/m ²
R_1	Resistencia térmica al exterior	m ² °C/W
R_2	Resistencia térmica al interior	m ² °C/W
R	Resistencia eléctrica	Ω
T	Temperatura	°C
t	Tiempo	s
v_1	Tensión eléctrica de entrada	V
v_2	Tensión eléctrica de salida	V

Símbolos

λ	Conductividad térmica	W/m°C
ΔT	Diferencial de temperatura	°C
ρ	Densidad	kg/m ³

Subíndice

A	Aire
e	Exterior
f	Foamular®
i	Interior
m_v	Masa variable
pe	Pared exterior
pi	Pared interior
pm	Mitad de la pared
R	Referencia
v	Variable

Resumen

En este documento se presenta un estudio teórico-experimental para la identificación del calor específico (C_{p_f}) y la conductividad térmica (λ_f) equivalentes de envolventes a partir de un modelo resistencia capacitancia RC, invariante en el tiempo. También en el trabajo se determinó la influencia en el C_{p_f} al adicionar masa en el interior de la muestra. En el estudio, la muestra fue una cavidad a escala hecha de foamar® con propiedades conocidas. Las funciones de transferencia se obtuvieron relacionando la temperatura exterior e interior de la muestra para el modelo RC propuesto. Los valores de C_{p_f} y λ_f se obtuvieron de los coeficientes de las funciones de transferencia en tiempo continuo $G(s)$.

En los resultados se observó que el modelo RC invariante en el tiempo utilizado, solo fue aplicable para ciertos periodos a lo largo del día, que fue de las 4 a 9 am. Considerando esto, la metodología propuesta permitió determinar el C_{p_f} y λ_f y la incertidumbre debido a una masa en el interior de la cavidad. El C_{p_f} resultó de 1593 J/kg°C, con una desviación promedio de 7.10% respecto al valor de referencia $C_{p_f} = 1715$ J/kg°C. La conductividad térmica fue de 0.024 W/m°C con una desviación promedio de 3.30% en relación al valor reportado por el fabricante. También, el valor del C_{p_f} resultó ligeramente diferente al adicionar masa en el interior de la muestra; al adicionar 0.5 kg el valor se incrementó en 2.07% (33 J/kg°C), y adicionando 1.3 kg, el incremento fue de solo 2.3 % (37 J/kg°C).

Con lo anterior se observó que el modelo desarrollado, en periodos del día, permitió reproducir los valores del calor específico y de la conductividad térmica equivalentes de una muestra de referencia de manera adecuada. También permitió observar, que a esta escala, la influencia de la masa al interior resulta poco representativa.

Abstract

An experimental study was carried out to identify thermal parameters of building envelopes, using a resistance capacitance model. Also, the influence on the Cp_f was determined varying the internal thermal mass. A foam cavity at scale size was used as a reference sample. By considering a RC model, the transfer functions were determined correlating external and internal temperatures. Then, the Cp_f and λ_f values were determined considering the coefficients of the transfer functions.

The RC model was applicable for a specific period of day only (4 to 9 am), due to the non-time variable consideration of the model. The Cp_f and λ_f were determined at these periods, as well as its uncertainty due to the internal mass variation. The Cp_f was 1593 J/kg°C, with a deviation of 7.10% beside reference value (1715 J/kg°C). The thermal conductivity was 0.024 W/m°C with a deviation of 3.30% beside the manufacturer value. It was also observed that the value of Cp_f was slightly different adding internal mass, by adding 0.5 kg this increase 2.07% (33 J/kg°C) and with 1.3 kg, the increase was only 2.3% (37 J/kg°C). It can be seen that the model reproduce well the Cp_f and λ_f of a reference sample taking in to account a specific periods of day only. Also, the influence of the internal mass was not very representative, at the scale of the used sample.

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presentan las generalidades, la revisión bibliográfica de la evaluación térmica en envolventes de edificaciones, el objetivo y los alcances de la tesis. La revisión bibliográfica se dividió en estudios teóricos, numéricos, teóricos-experimentales, normas aplicables para la caracterización y evaluación de la transferencia de calor en envolventes de edificaciones.

1.1 Generalidades.

La crisis energética de los años setentas y el aumento en el interés a nivel mundial del desarrollo sustentable, han dado lugar a cambios estructurales en los patrones de consumo de energía en varios países. Así, el consumo de energía como indicador del desarrollo económico de un país ha evolucionado y debe combinarse con indicadores de ahorro y uso eficiente de la energía. Sin embargo, aun así, en los últimos años se ha incrementado considerable el consumo energético, dejando como consecuencia un aumento en la contaminación, agotamiento de los recursos energéticos, y un desequilibrio económico y de sostenibilidad no sólo energética sino también ambiental [Galindo, 2009].

En México, el consumo de energía en las edificaciones representa el 50% por acondicionamiento de espacios [CONUEE, 2011], en el caso de una edificación, los equipos de acondicionamiento de aire pueden llegar a representar del 10% al 20% del costo total [Ávila e Islas, 1994]. Derivado de esto, se han establecido normas y certificaciones energéticas, como la NOM-008-ENER-2001, NOM-018-ENER-2011, NOM-020-ENER-2011 y NOM-024-ENER-2012, entre otros, con el fin de inducir diseños térmicos de los edificios que requieran un mínimo consumo de energía para lograr confort térmico.

En el diseño térmico de edificaciones, las componentes de edificaciones juegan un papel importante en la transferencia de calor tanto al exterior como al interior, por lo que poner atención a su diseño, configuración y su uso es prioritario para el ahorro de energía. Los parámetros térmicos y ópticos característicos de las componentes permiten comparar opciones al momento de diseñar, tanto para su optimización térmica como para su optimización económica. El desempeño de los materiales depende de las condiciones de temperatura, velocidad del flujo, insolación, humedad relativa y de manera particular de su configuración. Más aún, se ha encontrado que los parámetros térmicos son dependientes de las condiciones de operación. Por ejemplo, en modelos en estado permanente, los coeficientes de transferencia de calor afectan en el cálculo del U y el $CGCS$ hasta un 10%, esto de acuerdo a Macías-Melo *et al.* (2013) y Collins (2004).

Por otro lado, los modelos en estado transitorio, permiten lograr mejores aproximaciones en la evaluación de parámetros térmicos en componentes, sin embargo utilizan la evaluación de parámetros como son la difusividad térmica, el factor de decremento (f) y el tiempo de retraso (ϕ) y/o los coeficientes de función de transferencia [Macías-Melo, 2013]. En la mayoría de los trabajos reportados, las metodologías para determinar la difusividad térmica están enfocadas en materiales homogéneos, o para situaciones simplificadas donde el estímulo es una función hipotética o para condiciones estándares, como es el caso cuando se determina ϕ y f . Por lo anterior, se observa que, cualquier esfuerzo encaminado a la determinación de parámetros para modelos en estado transitorio es conveniente.

Por otro lado, el estudio de los procesos de transferencia de calor en cavidades ha venido siendo una manera de simplificar el problema. Esta simplificación ha facilitado el entendimiento y la determinación de parámetros; también, ha permitido modelar la dinámica de flujo, los procesos de transferencia de calor y ha contribuido al desarrollo de modelos matemáticos [Valencia, 2005]. En los últimos años se han presentado trabajos relacionados con la transferencia de calor en estado transitorio y la aplicación de técnicas para la identificación de parámetros [Baker y Van Dijk, 2008], con lo que se ha observado reducción de incertidumbres, costos de cómputo y tiempos de evaluación, por lo que el interés en este tipo de simulaciones se ha incrementado.

En la mayoría de los trabajos reportados se ha encontrado la evaluación de parámetros como $CGCS$ y U , aplicando metodologías en estado permanente y para evaluaciones en estado transitorio como ϕ y f , en su mayoría realizando estudios de forma teórica-numérica. En los últimos años se ha incrementado el interés en el análisis de componentes de edificaciones en estado transitorio debido al alto consumo que se tiene de energía. Considerando lo anterior, se observa conveniente evaluar los parámetros característicos de materiales de edificación como son el calor específico y la conductividad térmica, con el fin de optimizar el uso de la energía.

Las aportaciones de este estudio están dirigidas al desarrollo de una metodología que con base en modelos resistencia- capacitancia, y evaluaciones en estado transitorio facilite en tiempo y forma la determinación de parámetros de envolventes de materiales aislantes ligeros, como lo

es el foamular® para que en trabajos futuros pueda ser aplicada a materiales no homogéneos. Además que contribuya al confort térmico y al ahorro de energía.

1.2 Revisión bibliográfica.

En esta sección se presentan los trabajos revisados en los que se encuentran estudios teóricos, experimentales y numéricos de la evaluación térmica de componentes de edificaciones.

1.2.1 Estudios teóricos basados en modelos RC.

Fraisse *et al.* (2002) presentaron un modelo basado en circuitos RC para determinar el comportamiento térmico de edificaciones, en este estudio utilizan acoplamientos de paredes con aislantes de diferentes tamaños y calefacción del suelo. En el modelo consideran tres resistencias y cuatro capacitancias, el modelo se comparó con dos más donde se realizaron análisis de tiempo y frecuencia, en los modelos de comparación consideraran de uno a tres resistencias y dos capacitancias. El modelo fue integrado al software de simulación TRNSYS. En este estudio se observó que el modelo presenta una variación mínima en la constante de tiempo del 5% debido a las capacitancias consideradas, el modelo propuesto reproduce los resultados de manera adecuada para el comportamiento térmico de edificaciones y tiene como ventaja evaluar varias paredes sin especificar los pasos de tiempo.

Jiménez *et al.* (2008) 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. Los modelos invariantes en el tiempo se obtienen del análisis de malla en un circuito, donde la componente bajo prueba se representa con dos resistencias y una capacitancia. Para la identificación de los parámetros de las ecuaciones del modelo se utilizó un método auto-regresivo de identificación ARMAX. La validación se realizó utilizando las mediciones sobre una pared de características térmicas conocidas en una celda Paslink. Las variables de entrada fueron la temperatura exterior e interior y la variable de salida el flujo de calor a través de la componente. La aproximación fue evaluada con un error de salida, es decir, la diferencia entre

el flujo de calor simulado y el real, además, se consideró dentro de las ecuaciones una fracción del ruido de las mediciones con comportamiento oscilatorio.

Jiménez *et al.* (2009) presentaron tres modelos que aproximan el comportamiento de la transferencia de calor, los modelos permiten identificar el $CGCS$ y el U a partir de datos experimentales. Los modelos presentados fueron de resistencia-capacitancia (RC), de función de transferencia continua y espacio estado continuo. La capacidad de predicción de dichos modelos se validó con las mediciones de flujo de calor en una pared opaca homogénea de propiedades conocidas. La validación mostró que los tres modelos predicen los flujos de calor al interior dentro del intervalo de incertidumbre del calorímetro, aunque los de mejor desempeño fueron el modelo RC y el modelo espacio estado continuo.

Ghiaus y Hazyuk (2010) presentaron un modelo para la simulación de edificaciones basado en circuitos térmicos (RC). Los datos para llevar a cabo este estudio fueron considerados al diseñar la edificación y las condiciones ambientales. Las variables de entrada que se utilizaron en este modelo son las ganancias de calor interna, la ventilación, la infiltración en la edificación y variables meteorológicas. En este estudio consideran una capacitancia de los elementos de la envolvente y dos resistencias para representar a la envolvente, para el aire al interior y los muebles se representaron con una capacitancia equivalente. La solución del problema se realizó resolviendo la transformada de Laplace para obtener sus funciones de transferencia. En este estudio se observó que con los resultados del modelo es posible predecir los flujos de calor y las temperaturas al interior de la edificación.

En esta sección de la revisión bibliográfica se encontró que el comportamiento térmico de las envolventes de edificaciones se ha venido realizando con analogías de circuitos eléctricos, utilizando modelos resistencia-capacitancia (RC), para predecir el flujo de calor y las temperaturas al interior de las edificaciones. Los parámetros característicos se determinan utilizando principalmente identificación de parámetros, software de simulación y funciones de transferencia. Por otro lado, se encontró que los modelos RC, cuando se integran al software

como es el caso de TRNSYS, presentan variaciones hasta del 5% en la constante de tiempo, debido a las capacitancias consideradas.

1.2.2 Estudios Teóricos basados en programas de simulación.

Ulgen (2002) analizó el comportamiento térmico de 10 tipos de paredes. El autor calculó teóricamente el valor del tiempo de retraso (ϕ) y el factor de decremento (f) de las 10 paredes en función de la temperatura sol-aire, los resultados obtenidos fueron comparados de manera experimental. Para obtener los parámetros característicos, el autor empleó una cámara de ambiente controlado tipo *hot box* con muestras de 1 x 1 m. La diferencia entre el estudio teórico y experimental fueron menores a 10%, además se observó que el autor empleó muestras opacas y con masa térmica considerable, con tiempo de retraso no menores a nueve horas.

Kossecka y Kosny (2004) presentaron un estudio para determinar los coeficientes de la función de transferencia por conducción en paredes ensambladas y considera tres dimensiones. El estudio se llevó a cabo utilizando el código numérico HEATING 7.2, el cual resuelve el modelo matemático utilizando la técnica de diferencias finitas y el método de función de transferencia considerando cinco decimales. En el estudio se analizaron 20 materiales distintos, por mencionar algunos como paredes transparentes, muros de mampostería con o sin aislante y en algunos casos con marcos de acero o madera. Los resultados obtenidos fueron comparados con los reportados en ASHRAE 1145-TRP los cuales presentaron una desviación estándar media de 0.00036 para x y 0.0000032 en y . Se observó que el código HEATING 7.2 reproduce adecuadamente los resultados ya que presentaron una desviación estándar en los factores de respuesta con poca incertidumbre.

Asan (2005) presentó un estudio numérico de los retrasos de tiempo y los factores de decremento en materiales de construcción, se utilizó la ecuación de conducción en estado transitorio unidimensional y el esquema de Crank-Nicolson bajo condiciones de contorno de convección. El estudio se llevó a cabo con 26 materiales de construcción, variando el espesor ocho veces en cada caso. Para el código se consideraron valores de entrada como, el número de capas, el espesor de cada capa, la densidad de cada capa, el calor específico y la

conductividad térmica de cada capa y la generación de calor de cada capa, las salidas del código eran lapso de tiempo, factor de decremento, temperatura de la superficie interior de la pared y la temperatura de cualquier lugar, esto para cualquier momento del día. Los flujos de calor dependientes del tiempo que fueron calculados con el código se compararon con el análisis armónico de Threlkeld. En el trabajo se observa que cuando el espesor de la pared aumenta el factor de decremento disminuye, también para espesores de $L < 0.050\text{m}$ todos los materiales presentan factores de decremento casi constantes, para espesores de $L \geq 0.050\text{m}$ con alta difusividad térmica dan factores de decremento más altos y para valores de $L > 1\text{m}$ los factores de decremento tienden a cero. El espesor en materiales es considerable para determinar factores de decremento y retrasos de tiempo.

Gong y Huang (2006) presentaron un estudio sobre la transmitancia térmica en paredes de edificios en estado transitorio y permanente. El estudio se llevó a cabo con pruebas al interior en ambiente controlado utilizando dos métodos llamados método de análisis dinámico y método de identificación del sistema, los dos métodos fueron basados en dos modelos térmicos diferentes, los cuales fueron resueltos mediante modelos matemáticos y funciones de transferencia en tiempo discreto. Para el estudio se utilizó una caja caliente y una caja fría con el fin de mantener el estado de equilibrio, también se utilizó el método de análisis dinámico para obtener las propiedades del material en estado transitorio, los parámetros desconocidos como la transmitancia térmica y el coeficiente de transferencia de calor fueron obtenidos mediante la técnica de identificación conociendo las tasas de flujo de calor y temperaturas. Los métodos estudiados permiten generar un conjunto de ecuaciones lineales que luego se resuelven mediante técnicas computacionales. Se observó que los errores para el método dinámico fue de 1.18 % y para el método de identificación de parámetros térmicos fue de sólo 0.89 %, debido a que se realizó dentro del laboratorio. Se observa que el método de identificación fue el más preciso en la medición de la transmitancia y puede ser utilizado para obtener parámetros característicos de materiales.

Palyvos (2007) presentó una tabulación de las diferentes correlaciones para determinar los coeficientes convectivos externos debido al viento, así como también datos experimentales del coeficiente convectivo para componentes de edificaciones. En este trabajo se muestran los

números Nusselt, obtenidos en bancos de pruebas experimentales, donde se utiliza túnel de viento y programas de simulación de construcciones. En la tabulación realizada se observó que existen ecuaciones para determinar el coeficiente convectivo, observándose muy simples de manejar, también correlaciones que no son adecuadas para problemas particulares. El autor recomienda realizar más experimentos en campo y no en laboratorios con el fin de que los valores obtenidos se acerquen más a la realidad. En este trabajo se presenta una recopilación de las correlaciones del coeficiente convectivo del aire (h_w) y el valor de Nusselt (Nu) en envolventes de edificaciones y son un apoyo para el diseño dependiendo del problema que se demande.

Balocco *et al.* (2008) presentaron un estudio sobre el funcionamiento térmico y mecánico de un revestimiento exterior, aplicado a una pared comercial en las edificaciones existentes, el estudio se llevó a cabo mediante simulación en condiciones transitorias durante el verano. La comparación de los resultados con los desarrollos térmicos obtenidos simulando la pared sin el sistema del aislamiento demostró que el aislamiento externo es particularmente eficaz en la reducción de cargas de enfriamiento y de calefacción, y puede también garantizar comodidad térmica en el interior. Las tensiones de fatiga del revestimiento externo, investigadas utilizando simulación mediante el programa de ANSYS, demostraron que el cambio continuo de las cargas con la tensión cíclica limitada puede causar en un cierto plazo el deterioro de los materiales.

Baker y Van Dijk (2008) presentaron un estudio sobre la evolución que han tenido las pruebas en estado transitorio impulsadas por las actividades de investigación de la Red Paslink y una revisión del desarrollo histórico de los procedimientos de ensayo y análisis que se encuentran actualmente en uso y en desarrollo. Durante la revisión se encontró que la caracterización de componentes de edificaciones se ha realizado particularmente 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 de acumulación de calor en las muestras, y 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 desviaciones de los datos de prueba en estado transitorio. Además, se encontró que en la caracterización del desempeño de la componente o sistema, mediante identificación de parámetros disminuye la incertidumbre de los resultados en comparación con los métodos de prueba en estado permanente.

Peizheng y Lin-Shu (2011) presentaron un estudio del comportamiento de la transferencia de calor exterior de una masa térmica plana expuesto a cambios periódicos de calentamiento y enfriamiento. En este trabajo se investigó la transferencia de calor dinámica de la masa térmica utilizando madera y paredes de concreto bajo ondas térmicas sinusoidales externas y ambiente térmico con temperatura constante al interior, para determinar el factor de decremento y el factor de retraso de tiempo. Para la masa térmica exterior se consideraron las propiedades termofísicas constantes y fue tratado como un problema de transferencia de calor unidimensional. Se observó que para espesores iguales en la pared de madera y concreto, el lapso es 80 min mayor en la pared de concreto, excepto para espesores menores de 1m. También se observó que el factor de decremento es menor en la pared de madera. En conclusión la pared de madera resultó mejor que la pared de concreto para climas cálidos y secos.

Jin *et al.* (2012) presentaron un estudio teórico para evaluar el comportamiento térmico de una pared, en este estudio se evaluó el tiempo de retraso y el factor de decremento del flujo de calor. El estudio se basó en un modelo de transferencia de calor considerando una dimensión, y posteriormente fue resuelto de manera numérica. Se observó que el tiempo de retraso del flujo de calor aumenta al incrementar la capacidad térmica y el espesor de la pared y que disminuye con el aumento de la conductividad térmica de la pared. Además de que los flujos de calor se reducen cuando se aumenta la capacidad térmica de la pared, pero para el flujo de calor en un día no se puede reducir.

Mavromatidis *et al.* (2012) propusieron un método simple basado en la simulación factorial del cual se obtienen modelos de regresión en forma de funciones polinómicas que permiten

obtener el comportamiento térmico en paredes de materiales compuestos. Las funciones relacionan el ángulo, la conductividad térmica y el espesor de la componente. El modelo utilizado toma en cuenta el acoplamiento entre el sólido, la conducción entre el sistema sólido y la radiación. El estudio se llevó a cabo utilizando un software original que se basa en la modelización analítica y numérica detallada de los fenómenos de transferencia de calor que se producen en la pared de un material compuesto variando las condiciones. Los resultados obtenidos fueron comparados con resultados de diferentes modelos estudiados con anterioridad y con datos experimentales. En los resultados se encontró que el modelo numérico presenta un factor de confiabilidad de 0.9628. Además se encontró que dentro de sus ventajas es que permite evaluar diferentes perfiles de temperatura en paredes compuestas, así como también analizar espesores hasta de 1mm.

Fanhong *et al.* (2013) realizaron un estudio numérico de la transferencia de calor y masa en envolventes de construcción. En el estudio se simularon las etapas de congelamiento y el tiempo de secado, contemplando los parámetros de control y tomando en cuenta relaciones de equilibrio del coeficiente de conductividad térmica efectiva de la envolvente del material, la humedad relativa en la porosidad, la temperatura de congelación de la humedad líquida. El calor específico C_p , la difusividad térmica media α , el coeficiente de almacenamiento de calor y la inercia térmica se determinaron para muestras de hormigón, cemento y aislante. En el estudio se observó que la humedad influyó mayormente en la pared de hormigón y que causa una variación considerable del coeficiente de transferencia de calor (resistencia térmica) durante el invierno, lo que afecta el desempeño del aislante. Además, se observó que la densidad, el calor específico y el coeficiente de almacenamiento térmico disminuyeron en la etapa de secado y que la difusividad térmica aumentó con la temperatura.

Sami *et al.* (2013) presentaron un estudio teórico de la influencia que tiene el uso de diferentes materiales de construcción y las absorptividades en la superficie de una pared nominal, sobre la masa térmica crítica y el potencial de ahorro de energía. Los parámetros característicos como la masa crítica y el potencial de ahorro de energía, se utilizaron para determinar el espesor de la masa térmica que se requiere para obtener un porcentaje deseado de ahorro de energía. El estudio se llevó a cabo utilizando dos paredes una al interior y la otra al exterior, considerando

bloques de hormigón macizos y huecos. El espesor se varió entre 0 y 50 cm, manteniendo la resistencia térmica fija. La absorptividad de la superficie se estudió para valores de 0.4 y 0.2. La pared interior se expuso a una combinación de convección y radiación con el aire interior. La pared exterior se expuso a la transferencia de calor por convección con el aire exterior. En el estudio se utilizó un modelo matemático basado en un modelo de una dimensión dependiente del tiempo donde se analizó la conducción de calor en una pared compuesta. Se observó que para un determinado espesor de masa térmica crítica, el potencial de ahorro de energía más alto fue de 95% en las paredes sólidas de bloques de hormigón, paredes con baja capacidad calorífica de absorción en la superficie y paredes con masa térmica en su interior.

En esta sección se observó que el tiempo de retraso y el factor de decremento son función de la capacitancia térmica y la difusividad térmica del material, ya que cuando existe un aumento en el calor específico y la densidad de masa, también aumentan. El uso del método de identificación de sistemas permite obtener diferencias del 0.89%, mientras que con el método dinámico pueden ser de 1.18%, mostrando que el método de identificación del sistema puede ser más preciso en comparación al método dinámico. El uso de modelos matemáticos, programas de simulación como HEATING 7.2 y ANSYS, reproducen de manera adecuada el comportamiento térmico en componentes de edificaciones, utilizando el método dinámico, sin embargo estos métodos, utilizan parámetros evaluados bajo condiciones ideales, mientras que es más conveniente obtener valores más cercanos a la realidad.

1.2.3 Estudios experimentales.

Burch *et al.* (1990) presentaron una metodología para determinar los coeficientes de función de transferencia (CFT) utilizando una caja caliente calibrada. Para determinar las ganancias de calor a través de sus paredes se utilizaron transductores de flujo de calor. La caracterización de los transductores de flujo de calor en estado transitorio se determina con una muestra de referencia para medir las pérdidas de calor por las paredes. Los flujos de calor a través de la muestra se determinan mediante el efecto Joule y la potencia de enfriamiento. También, se evaluó la transferencia de aire entre las cámaras de la caja caliente. Los CFT fueron calculados con los datos de las mediciones horarias del flujo de calor y con las temperaturas debidas al

cambio lineal de 20°F en 0.42 h en la cámara climática. La aplicación de los coeficientes de transferencia para una excitación sinusoidal y los medidos en la caja caliente mostraron diferencias de 2.2 W, este valor se considera dentro del intervalo de incertidumbre del método utilizado.

Baker (2008) presentó una comparación entre los resultados de U obtenidos de la caracterización de dos elementos de edificación en pruebas al exterior utilizando celdas Paslink. Para las pruebas se utilizaron dos componentes: una pared opaca homogénea con una sección central desprendible y luego una ventana con vidrio doble que se utiliza para sustituir la sección central de la primera componente. El desempeño térmico de las componentes se determinó utilizando métodos de prueba en estado transitorio y métodos de identificación de parámetros. En los resultados se encontraron diferencias de 0.02 W/m² para el U de la pared opaca. Para el caso de la ventana los resultados tuvieron diferencias mayores, sin embargo, la variación de los resultados se consideró que se debieron a las condiciones de velocidad del viento y las diferencias de temperatura.

Macías-Melo (2008) presentó una metodología experimental para la calibración de termopares por comparación con un termómetro de resistencia de platino (PTR) basado en la norma ASTM E-220-02, (2002). El diseño y la construcción del equipo para calibrar los termopares consideran un medio de temperatura de referencia, un medio de comparación, una caja isotérmica, un nanomultímetro y un termómetro de resistencia de platino (PTR). El autor presenta la caracterización del sistema experimental y el procedimiento de calibración por comparación con termómetro de resistencia de platino. En este estudio se obtuvo el polinomio de corrección de la fuerza electromotriz en función de la temperatura correspondiente. La incertidumbre en la calibración de cada termopar fue en promedio de $\pm 0.150^\circ\text{C}$.

Sala *et al.* (2008) presentaron un estudio teórico-experimental de la transferencia de calor en una pared de ladrillo hueco utilizando una caja caliente. La caja caliente fue calibrada utilizando una muestra de referencia de poliestireno extruido (foamular®) de dos pulgadas en su interior y estableciendo un intervalo de temperaturas para realizar las pruebas. Las pruebas

se realizaron para la pared de ladrillo hueco con la misma variación en la temperatura que la muestra de referencia. Los resultados experimentales fueron comparados con los resultados obtenidos de la simulación de una pared equivalente en estado transitorio utilizando el programa LIDER (Limitación de demanda energética). En el trabajo se observó que es de suma importancia tener la función de transferencia para cada pared y que en el cálculo de la demanda energética de los edificios es importante caracterizar la inercia térmica de las paredes. También se concluyó que un estudio en paredes no sólo requiere conocer la masa térmica y la conductividad térmica para conocer su inercia, sino que además deben ser evaluadas en su configuración original.

Castillo (2010) presentó una metodología para evaluar el desempeño térmico de componentes de envolventes de edificaciones con masa térmica reducida, utilizando un calorímetro. La metodología implica pruebas al exterior en estado permanente en el calorímetro, utilizando muestras de vidrio claro de 3 mm con un área de 0.692 m^2 . La metodología consiste en determinar el coeficiente global de pérdidas de calor de la envolvente del calorímetro (U_{ev}), la constante de tiempo (C_t), el $CGCS$, y el U_c . En el estudio se observó que el coeficiente global de pérdidas (U_{ev}) fue de $1.04 \pm 0.20 \text{ W/m}^2\text{°C}$ y U_c de 0.83 ± 0.03 y, la constante de tiempo (C_t) resultó de 7.5 minutos. También, se observó que el flujo de calor a través de la envolvente fue 5.2% mayor que el valor de $CGCS$ al ser comparados.

Krüger y Adriazola (2010) presentaron un estudio para caracterizar térmicamente madera y derivados que usualmente se utilizan en la construcción. La caracterización se realizó elaborando celdas de un metro cúbico con materiales de prueba. Los materiales fueron cubiertos con pintura blanca y puestos en condiciones similares para que el flujo de calor sólo fuera afectado por la resistencia térmica del material, para hacer un comparativo entre materiales. La resistencia térmica fue obtenida con modelos en estado transitorio y comparada con los resultados obtenidos en estado permanente con un aparato con transductores de flujo de calor. El factor de amortiguamiento (f) fue obtenido de las amplitudes medias para una función de excitación no sinusoidal al interior y exterior de las celdas, en consecuencia el factor de amortiguamiento fue distinto para condiciones climáticas de invierno y verano. Los

resultados mostraron que el factor de amortiguamiento depende del material, la capacidad térmica, los coeficientes convectivos y la capacidad térmica interior.

Pisello *et al.* (2012) propuso un método para evaluar el rendimiento térmico en construcciones. La metodología consiste en realizar simulaciones en estado transitorio considerando las mediciones experimentales, el procesamiento de los resultados se realizó en términos del índice de desviación térmica. El estudio se realizó de manera experimental con tres diseños diferentes en las edificaciones considerando tipos de ventanas, cuartos, cocina y muestras de ladrillo. En el estudio se utilizaron técnicas de termografía utilizando una cámara FLIRB360 de acuerdo con la Norma ISO 6781 y simulaciones mediante el programa Energy plus. Se observó que durante verano el clima tiene un efecto significativo en las edificaciones y que el coeficiente de sensibilidad es 50% mayor en envolventes opacos. En particular, los valores del coeficiente de sensibilidad resultan mayores en verano que en invierno por más de 40%.

Macías-Melo (2013) presentó un estudio experimental de evaluación térmica en componentes de edificaciones. La investigación se llevó a cabo realizando pruebas al exterior en estado transitorio y variando los coeficientes convectivos. Para realizar las pruebas se diseñó un calorímetro solar y se utilizó una muestra de vidrio claro y un espécimen de referencia. Se utilizaron modelos RC y funciones de transferencia para determinar los parámetros característicos del sistema y los flujos de calor. En la investigación se observó que los flujos de calor varían un 21% debido a la variación de los coeficientes convectivos al interior y que los flujos de calor presentaron un error estándar de estimación de 5.79 W para el espécimen y 7.03 W para el vidrio.

En esta sección se encontró que las celdas calorimétricas como las celdas Paslink y las cajas calientes son utilizadas, bajo el esquema de calorimetría de flujo. Baker en 2008 utilizó celdas Paslink para comparar los resultados de dos elementos de edificaciones (vidrio doble y pared opaca). Por otra parte, Burch en 1990 utilizó una caja caliente calibrada para obtener los coeficientes de función de transferencia. También se observó que los parámetros

característicos para realizar los estudios de transferencia de calor son el $CGSC$, U , f y ϕ , y que mediante el uso de las funciones de transferencia estos parámetros pueden ser determinados, además de que se pueden predecir los flujos de calor al interior de una cavidad.

1.2.4 Estandarización de procesos térmicos.

La norma NOM-008-ENER (2001) presenta una metodología para determinar las ganancias de calor en edificaciones no residenciales a través de su envolvente y los métodos de pruebas que se deben realizar. La metodología indica que el techo, pared, superficie interior y piso deben ser considerados en el estudio de transferencia de calor, tomando en cuenta el efecto de la conducción y radiación sobre la envolvente. De acuerdo a las ecuaciones indicadas en la norma, para Cuernavaca, Morelos, los coeficientes de transferencia de calor por conducción son de $0.391 \text{ W/m}^2\text{K}$ para techos y $2.200 \text{ W/m}^2\text{K}$ para muros.

ISO 11357-4 (2005) presentó un procedimiento para determinar el calor específico (C_p), a través de calorimetría diferencial de barrido. La cantidad de calor se determina a partir de los cambios de temperatura de una cantidad de sustancia de capacidad calorífica conocida. 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. Cuando se utiliza una sustancia bien caracterizada en el intervalo de temperaturas de pruebas correspondiente, permite que esta técnica calorimétrica de comparación tenga incertidumbres menores que 1%. La forma de determinar la incertidumbre se puede aplicar a la calorimetría de flujo conociendo la incertidumbre en el C_p del agua.

La norma NOM-018-ENER (2011) presenta los requerimientos y los métodos de pruebas que deben cumplir los productos, componentes y elementos termoaislantes, para techos, plafones y muros de las edificaciones excluyendo los aislantes en las cimentaciones. Los métodos de prueba permiten evaluar la conductividad térmica, la densidad aparente, la permeabilidad al vapor de agua, la adsorción de humedad y la absorción de agua en los materiales homogéneos

con propiedades de aislantes térmicos. Las pruebas para evaluar las propiedades son realizadas con las especificaciones que proporciona el fabricante.

Los métodos de prueba permiten determinar la conductividad térmica, la densidad aparente, adsorción de humedad, absorción de agua únicamente para materiales con propiedades de aislantes térmicos homogéneos. En la calorimetría diferencial de barrido, la incertidumbre depende de la capacidad calorífica de la sustancia de referencia o de la capacidad calorífica del fluido de trabajo. Los requerimientos y métodos de pruebas no son aplicables a materiales no homogéneos como es el caso de los productos o componentes que usualmente se utilizan como componentes en las edificaciones.

1.3 Conclusión de la revisión bibliográfica.

En la revisión bibliográfica se encontraron diferentes metodologías para evaluar el comportamiento térmico de envolventes de edificaciones, ya sea de manera teórica o experimental. En estudios experimentales en estado transitorio los principales parámetros que describen su desempeño térmico están definidos por el modelo de predicción a utilizar, donde se resaltan el, f , $CGCS$ y el U . Además se pudo observar que el valor del Cp y λ varían en un intervalo amplio dependiendo a las condiciones de prueba y su aplicación, y que la conductividad térmica depende principalmente de la densidad, temperatura, cantidad de humedad y la estructura del material.

También se observó, que el uso del método de identificación de sistemas permite obtener diferencias en el calor específico de sólo el 0.89%, mientras que el método dinámico puede ser hasta de 1.18%, mostrando que el método de identificación del sistema es más preciso en comparación al método dinámico.

Sin embargo, para estudios en estado transitorio la evaluación del calor específico se determina principalmente con el método de calorimetría diferencial de barrido para materiales homogéneos. Hasta el momento, no se encontraron metodologías para determinar el calor

específico de muestras mediante métodos basados en modelos RC o identificación de parámetros considerando materiales no homogéneos de manera experimental.

1.4 Objetivos y alcances.

En esta sección se presentan los objetivos y alcances planteados para el desarrollo de la tesis.

1.4.1 Objetivo general.

Desarrollar un método para determinar el calor específico y la conductividad térmica equivalentes de un material aislante ligero utilizado en envolventes de edificaciones (foamular®), mediante pruebas con cavidades a escala y utilizando modelos resistencia-capacitancia.

1.4.2 Objetivos particulares.

- I. Desarrollar una metodología para evaluar el calor específico y la conductividad térmica equivalentes utilizando una cavidad a escala y modelando con circuitos resistencia-capacitancia para la identificación de parámetros.
- II. Evaluar el calor específico y la conductividad térmica del foamular® que compone a una cavidad a escala, (propiedades conocidas), y determinar de manera comparativa la desviación de los resultados del método propuesto respecto a las propiedades reportadas.
- III. Evaluar la influencia de variar la masa térmica en el interior de la cavidad de manera comparativa.

1.4.3 Alcances.

- I. Determinar la función de transferencia utilizando los modelos de resistencia-capacitancia en una cavidad a escala construida con foamular®.
- II. Evaluar el calor específico y la conductividad térmica equivalente del foamular® y determinar la diferencia.

- III. Determinar de manera comparativa la influencia sobre el valor C_p del foamular® al variar la masa térmica en el centro del interior de la cavidad.

1.5 Estructura de la tesis.

En el Capítulo 1 se presentó la revisión bibliográfica que justifica el trabajo de tesis, así como, los objetivos y alcances de este trabajo. En el Capítulo 2, se presentan los fundamentos teóricos y los modelos para realizar la identificación de los parámetros térmicos. En el Capítulo 3, se presenta la construcción de la cavidad de prueba, la instrumentación, el equipo experimental y la metodología experimental. En el Capítulo 4, se presentan los resultados de la caracterización de la muestra bajo condiciones de laboratorio en estado transitorio, y en el Capítulo 5, se presentan las conclusiones y las recomendaciones para trabajos futuros. Por otra parte, en el Apéndice A, se presenta la calibración de los sensores de temperatura y en el Apéndice B, se presenta la determinación de los coeficientes de transferencia de calor.

Capítulo 2

Modelos

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos, el modelo físico y el modelo matemático con el que se obtienen los coeficientes de función de transferencia para la identificación del calor específico (C_p) y la conductividad térmica (λ_f) equivalentes del foamular®.

2.1 Mecanismos de transferencia de calor.

En esta sección se presenta el marco teórico con relación a los mecanismos de transferencia de calor involucrados en este trabajo.

2.1.1 Conducción.

La conducción es un tipo de transferencia de energía, donde se establece que existe una transferencia de energía (calor) del medio más caliente al medio más frío. En otras palabras es la transferencia de energía de las partículas más energéticas hacia las menos energéticas, esta interacción entre partículas puede darse por movimientos aleatorios (difusión de la energía) o por movimientos vibratorios.

Para determinar la transferencia de calor por conducción para una placa plana unidimensional de acuerdo con la ley de Fourier se tiene que:

$$Q_{cond} = -k\left(\frac{dT}{dx}\right) \quad (2.1)$$

donde Q_{cond} (W/m^2) es la rapidez de transferencia de calor por conducción, dT/dx es el gradiente de temperatura, y k ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$) es la conductividad térmica del material. La **Figura 2.1** muestra el flujo de calor por conducción en una pared.

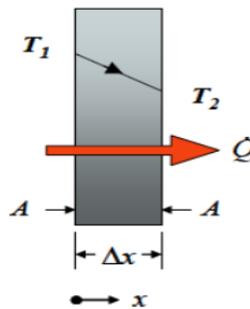


Figura 2.1 Flujo de calor por conducción.

2.1.2 Convección.

Mecanismo de transferencia de energía que sucede entre una superficie y un fluido. Sin embargo, los coeficientes convectivos no son sencillos de especificar debido a que se debe considerar la geometría de la superficie y la naturaleza del fluido (convección natural o forzada), así como las propiedades del mismo.

Para determinar la transferencia de calor por convección se utiliza la ecuación de la ley de enfriamiento de newton:

$$q_{conv} = h_{conv}A(T_w - T_{\infty}) \quad (2.2)$$

donde q_{conv} es la transferencia de calor por convección, h_{conv} es el coeficiente local de transferencia de calor por convección, A es el área de la superficie, T_w es la temperatura de la superficie y T_{∞} es la temperatura del medio ambiente. La **Figura 2.2** muestra el flujo de calor por convección a través de la placa.

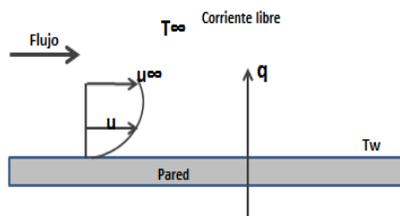


Figura 2.2 Flujo de calor por convección.

2.1.3 Radiación.

La radiación es la energía emitida por la materia en la forma de *ondas electromagnéticas* (o *fotones*), como resultado de los cambios en las configuraciones de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio interpuesto.

El flujo de calor por radiación que se transfiere o se emite por unidad de área, y se rige por la ley de Stefan-boltzmann y se expresa con la siguiente ecuación:

$$q_{rad} = \sigma \epsilon (T_s^4 - T_{sup}^4) \quad (2.3)$$

donde q_{rad} es la rapidez de transferencia de calor por radiación, T_{sup} es la temperatura de la superficie de la placa, T_s es la temperatura ambiente, σ es la constante de Stefan-boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{k}^4$) y ε es la propiedad térmica de la superficie de cada material conocida como emisividad, donde su valor va desde $0 \leq \varepsilon \leq 1$. En la **Figura 2.3** se muestra el flujo de calor por radiación entre una placa y los alrededores.

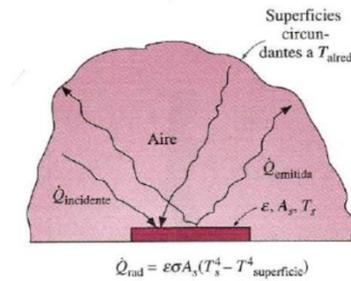


Figura 2.3 Flujo de calor por radiación.

2.2 Funciones de transferencia.

La función de transferencia de un sistema es la relación entre la transformada de Laplace de la variable de salida y la transformada de Laplace de la variable de entrada, suponiendo que todas las condiciones iniciales se hacen iguales a cero [Dorft y Bishop, (2005)]; esta función representa la relación salida-entrada, y muestra la dinámica del sistema, que puede tener uno o más parámetros que varían. En general, los materiales presentan un comportamiento característico para oponer resistencia al flujo de energía, esto se conoce como resistencia R , y una capacidad de almacenamiento de energía que se conoce como capacitancia C .

Un circuito RC, es un circuito que cuenta con elementos pasivos y activos, donde los elementos activos son capaces de generar energía, por ejemplo generadores, inductores y fuentes de tensión, mientras que un elemento pasivo no es capaz de generar energía, como son la resistencia R y la capacitancia C . En un modelo RC las leyes básicas que utilizan para su solución, son la Ley de Ohm y la Ley de tensión de Kirchhoff. La ley de Ohm establece que la tensión eléctrica v a lo largo de un resistor es directamente proporcional a la corriente i que

fluye a través de un resistor. Por otra parte la Ley de tensión de Kirchhoff establece que la suma algebraica de todas las tensiones alrededor de una trayectoria cerrada (o lazo) es cero. En la **Figura 2.4** se presenta un ejemplo de un sistema modelado a partir de un circuito RC en el que se trabaja para obtener una función de transferencia.

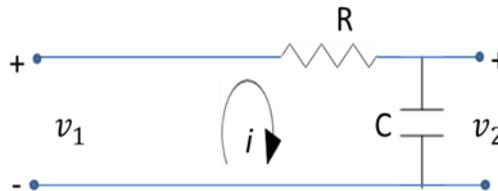


Figura 2.4 Circuito RC.

Aplicando la Ley de tensión de Kirchhoff en el circuito de la **Figura 2.4** se obtiene lo siguiente:

$$V_1(s) = \left(R + \frac{1}{Cs} \right) I(s) \quad (2.4)$$

y el voltaje de salida se puede expresar como:

$$V_2(s) = I(s) \left(\frac{1}{Cs} \right) \quad (2.5)$$

Resolviendo la **Ecuación 2.4** para $I(s)$ y sustituyéndolo en la **Ecuación 2.5** se tiene:

$$V_2(s) = \frac{(1/Cs)V_1(s)}{R + 1/Cs} \quad (2.6)$$

Entonces la función de transferencia es la relación de $V_2(s)/V_1(s)$ como se indica en la **Ecuación 2.7**.

$$G(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (2.7)$$

En un circuito térmico se trabaja fundamentalmente con el flujo de energía y con las diferencias de temperatura. Las variables en un circuito térmico son análogas al flujo de carga y a la diferencia de potencial de los circuitos eléctricos. Es decir, a la tensión eléctrica le corresponde la diferencia de temperaturas; a la corriente eléctrica, el flujo de calor; a la resistencia eléctrica, la resistencia térmica. Estas magnitudes están relacionadas entre sí por la ley de Ohm (caso de la electricidad) y por la ley de Fourier (conducción térmica).

En la **Tabla 2.1** se muestra las equivalencias entre un sistema térmico y un sistema eléctrico.

Tabla 2.1 Equivalencias de circuitos.

<i>Sistema Térmico</i>		<i>Sistema Eléctrico</i>	
<i>Flujo de calor (q)</i>		<i>Corriente (i)</i>	
<i>Diferencia de temperatura (ΔT)</i>		<i>Diferencia de potencial (ΔV)</i>	
<i>Resistencia térmica (R_T)</i>	$q = \frac{T}{R}$	<i>Resistencia (R)</i>	$i = \frac{V}{R}$
<i>Capacitor térmico (C_T)</i>	$q = \frac{dE}{dt}$	<i>Capacitor eléctrico (C)</i>	$i = C \frac{dv_c}{dt}$

2.3 Modelo físico.

En la **Figura 2.5** se muestra un diagrama de un módulo que representa a una cavidad expuesta a condiciones de laboratorio, donde a lo largo del día el flujo de calor que entra a través de la muestra $q_1(t)$, se debe al diferencial de temperatura que existe entre $T_e(t)$ y $T_i(t)$. La temperatura al exterior $T_e(t)$ experimenta variaciones durante el día, en consecuencia tiene influencia sobre la temperatura al interior $T_i(t)$, sobre la temperatura en la envolvente $T_{pe}(t)$ y $T_{pi}(t)$, en la temperatura de la masa de la envolvente m_f y en la temperatura de la masa variable del interior m_v . El flujo de calor $q_1(t)$ que entra se divide en dos partes, la primera $q_2(t)$ que se almacena en la envolvente por su capacitancia térmica del material $m_f C_{pf}$ y la segunda $q_3(t)$ que pasa al interior de la muestra, a la temperatura $T_i(t)$ y a su paso parte se almacena en la masa variable que se dispone en el interior, debido a su capacitancia térmica $m_v C_{pm}$. La

temperatura al interior $T_i(t)$, así como la temperatura $T_{pe}(t)$ y $T_{pi}(t)$ de la envolvente dependen de las propiedades termofísicas del material.

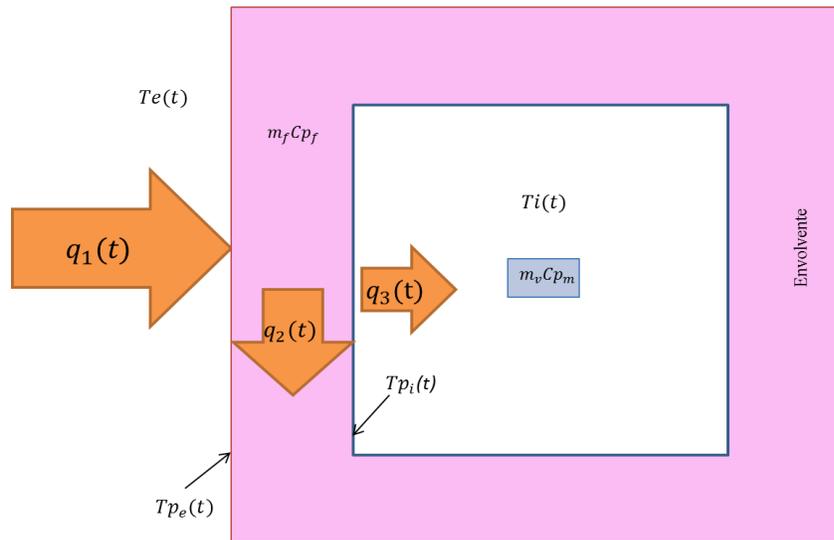


Figura 2.5 Modelo físico.

2.4 Modelo matemático.

Con base en el modelo físico de la **Figura 2.5**, se construyó el modelo matemático y se propone el modelo en términos de circuitos térmicos tipo RC como se muestra en la **Figura 2.6**. El circuito térmico consta de dos resistencias y dos capacitores para obtener los parámetros térmicos característicos de la componente de edificación. Para la solución del modelo RC se aplica el análisis de malla de acuerdo a la ley de Kirchhoff, posteriormente si la magnitud de la excitación se conoce para cualquier tiempo (función continua), entonces la solución se obtiene aplicando la transformada de Laplace. Por otra parte, si la magnitud de la excitación sólo se conoce en instantes de tiempo (función discreta), entonces la solución se obtiene aplicando la transformada Z. El modelo matemático propuesto permite determinar la resistencia térmica, el calor específico equivalente, y el cambio en estas propiedades cuando se varía la masa térmica en el interior de la cavidad, a partir de determinar la excitación $T_e(t)$.

En el modelo se considera lo siguiente:

- Flujo de calor semejante a través de todas las paredes de la cavidad.
- Propiedades termofísicas constantes.
- La temperatura al interior y al exterior se representa en un solo punto de la cavidad.
- No se considera efecto de borde.
- Modelo invariante en el tiempo.

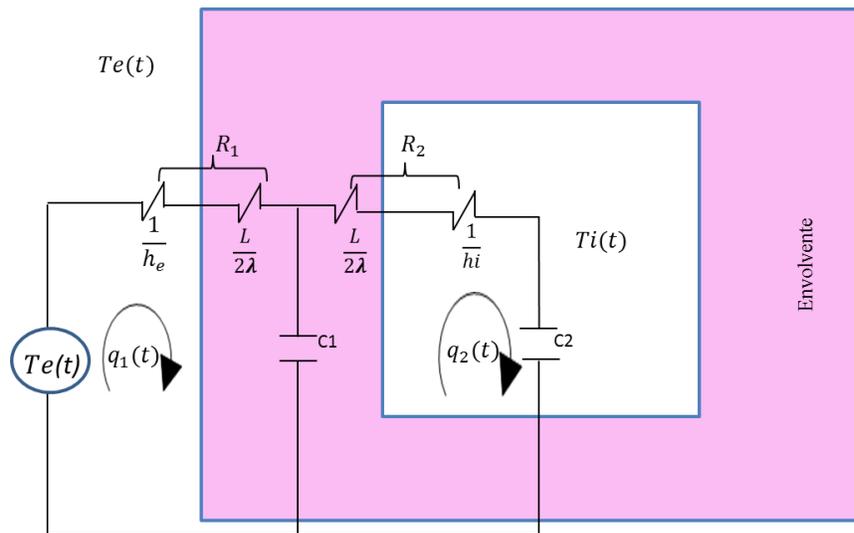


Figura 2.6 Modelo en términos de circuitos térmicos.

2.4.1 Modelo RC tiempo continuo.

En el modelo de la **Figura 2.6** se muestra el circuito térmico el cual es excitado por la temperatura exterior $T_e(t)$. Se puede observar que existen resistencias involucradas en el circuito, la primera resistencia al flujo de calor $q_1(t)$, es R_1 , dicho flujo se divide en dos partes una que se almacena en C_1 y la otra parte que pasa al interior de la cavidad a través de la resistencia R_2 . Debido a que existen dos mallas en el circuito térmico, las resistencias pueden ser simplificadas ya que se encuentran en serie, y pueden ser expresadas como sigue:

$$R_1 = \frac{1}{h_e} + \frac{L}{2\lambda} \tag{2.8}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_i} + \frac{L}{2\lambda} \tag{2.9}$$

A partir del análisis de malla y basándose en la segunda ley de Kirchhoff se obtienen las siguientes **Ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12**. Considerando que R representa las resistencias térmicas, q a los flujos de calor y C las capacitancias, entonces se tiene:

$$R_1 q_1 + \frac{1}{c_1} \int (q_1 - q_2) dt = T_e(t) \quad (2.10)$$

$$R_2 q_2 + \frac{1}{c_1} \int (q_2 - q_1) dt + \frac{1}{c_2} \int q_2 dt = 0 \quad (2.11)$$

$$T_i(t) = \frac{1}{c_2} \int q_2 dt \quad (2.12)$$

donde $T_e(t)$ representa la temperatura al exterior, $T_i(t)$ la temperatura al interior de la muestra, C_1 la acumulación de energía en la envolvente, C_2 la acumulación de energía de la masa al interior, $q_1(t)$ y $q_2(t)$ los flujos de calor y, R_1 y R_2 las resistencias a los flujos de calor.

Para las **Ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12** se obtiene la transformada de Laplace considerando que las condiciones iniciales de almacenamiento de energía son cero, el cambio de q por Q es para indicar que se aplica la transformada sobre la variable q , de esta manera se expresa como sigue:

$$R_1 Q_1(S) + \frac{1}{c_1 S} [Q_1(S) - Q_2(S)] = (T_e)(S) \quad (2.13)$$

$$R_2 Q_2(S) + \frac{1}{c_1 S} [Q_2(S) - Q_1(S)] + \frac{1}{c_2 S} [Q_2(S)] = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{c_2 S} [Q_2(S)] = T_i(S) \quad (2.15)$$

De la **Ecuación 2.13** despejando Q_1 y posteriormente sustituyéndola en la **Ecuación 2.14** se obtiene la función de transferencia expresada en la **Ecuación 2.16** para el flujo de calor al interior Q_2 , como función de $T_e(t)$, finalmente tomando la **Ecuación 2.15** y sustituyéndola en la **Ecuación 2.16** se obtiene la **Ecuación 2.17**, que relaciona la temperatura al interior $T_i(t)$ en función de la temperatura al exterior $T_e(t)$.

$$\frac{Q_2(s)}{T_e(s)} = \frac{C_2 S}{[(R_2 R_1 C_1 C_2) S^2 + (R_1 C_1 + C_2 R_1 + R_2 C_2) S + 1]} \quad (2.16)$$

$$\frac{T_i(s)}{T_e(s)} = \frac{1}{[(R_2 R_1 C_1 C_2) S^2 + (R_1 C_1 + C_2 R_1 + R_2 C_2) S + 1]} \quad (2.17)$$

La identificación de parámetros se realiza a partir de la función de transferencia en tiempo continuo, conociendo los coeficientes de la función de transferencia (CFT₁ y CFT₂) ubicados en el denominador de la ecuación, los coeficientes se obtienen como se muestra en la **Sección 2.3.3**. La función tiene la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{b_0 s^m + \dots + b_1 s^{m-1} + b_m}{a_0 s^n + \dots + a_1 s^{m-1} + a_n} \quad (2.18)$$

Una vez conocidos los coeficientes de la función de transferencia, los coeficientes de transferencia de calor y el valor de la conductividad térmica equivalentes, se determinan R_1 y R_2 para luego identificar el valor de C_1 con las **Ecuaciones 2.19** y **2.20**. Es de observar que el coeficiente a_0 , de la **Ecuación 2.19**, es más sensible debido a que afecta al término cuadrático.

$$a_0 = R_2 R_1 C_1 C_2 \quad (2.19)$$

$$a_1 = R_1 C_1 + C_2 R_1 + R_2 C_2 \quad (2.20)$$

Una vez determinada la capacitancia térmica, el calor específico equivalente se determina dividiendo el valor de la capacitancia térmica C_1 entre el valor fijado de la masa de la muestra.

$$Cp_f = C_1 / m_f \quad (2.21)$$

2.4.2 Modelo RC tiempo discreto.

Para generar la función en tiempo discreto se requiere conocer las temperaturas al interior y al exterior. Al conocer la función de transferencia en tiempo continuo, es posible obtener una

función que involucra el muestreo de los datos en periodos constantes de tiempo, dicha secuencia de valores surgen del muestreo experimental en intervalos de tiempo constantes.

Para el caso de estudio, se recogen datos experimentales y se genera una entrada y una salida y se identifica una función de transferencia en tiempo discreto con la forma de la **Ecuación 2.22**, esto se lleva a cabo en la plataforma de *Ident* de Matlab, utilizando un método auto-regresivo ARX.

$$G(z) = \frac{b_m z^m + \dots + b_1 z^{n-1} + b_0}{a_n z^n + \dots + a_1 z^{n-1} + a_0} \quad (2.22)$$

En la **Sección 3.3** se presenta de manera conceptual la metodología experimental para la identificación de los parámetros.

2.4.3 Verificación teórica del modelo.

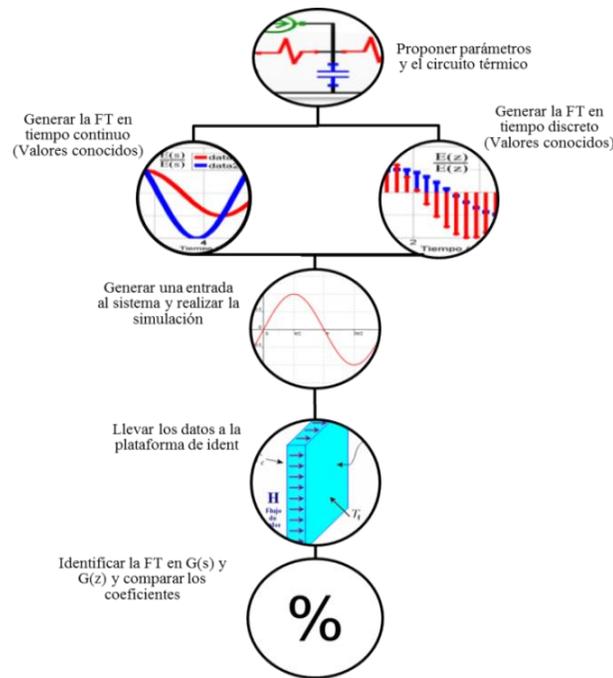


Figura 2.7 Verificación de coeficientes de función de transferencia.

La verificación de las funciones de transferencia se realiza con datos conocidos del material de referencia (foamular®), de acuerdo al diagrama de la **Figura 2.4**. En el diagrama se puede

observar que a partir del modelo RC establecido y los parámetros de las propiedades del material utilizado es posible determinar tanto las funciones de transferencia en tiempo continuo y como en tiempo discreto, además de poder determinar la respuesta del sistema a partir de una excitación y del modelo propuesto. Una vez conocida la serie de datos de la respuesta del sistema y la excitación son exportados a la plataforma de *Ident* en la cual se identifica una nueva función de transferencia en tiempo continuo y discreto. Finalmente se hace una comparación de los coeficientes de función de transferencia.

Resultados de la verificación.

Temperatura de entrada (Excitación).

$$T_e = 25 + 10 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi t}{86400} \right)$$

Tabla 2.2 Parámetros utilizados en la simulación.

<i>Descripción</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
Calor específico del foamular®	$C_{p_f}=1715$	[J/kg°C]
Calor específico del aire	$C_{p_A}=1024$	[J/kg°C]
Densidad del foamular®	$\rho_f=32$	[kg/m ³]
Densidad del aire	$\rho_A=1.204$	[kg/m ³]
Longitud	$L=0.0508$	[m]
Conductividad térmica	$\lambda_f=0.024$	[W/m°C]
Coficiente de transferencia de calor al interior	$h_i=9.48$	[W/m ² °C]
Coficiente de transferencia de calor al exterior	$h_e=13.4$	[W/m ² °C]

En la **Figura 2.8a y 2.8b** se muestra una comparación de la simulación realizada en la plataforma de Matlab con la simulación realizada en *Ident*. En la **Tabla 2.3** se muestran las funciones de transferencia obtenidas en cada una de las plataformas.

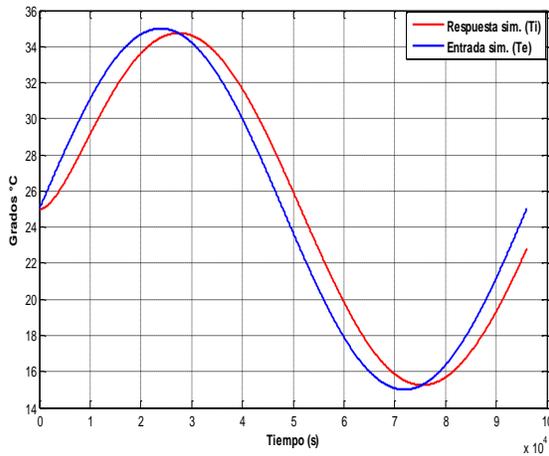


Figura 2.8a Simulación en Matlab.

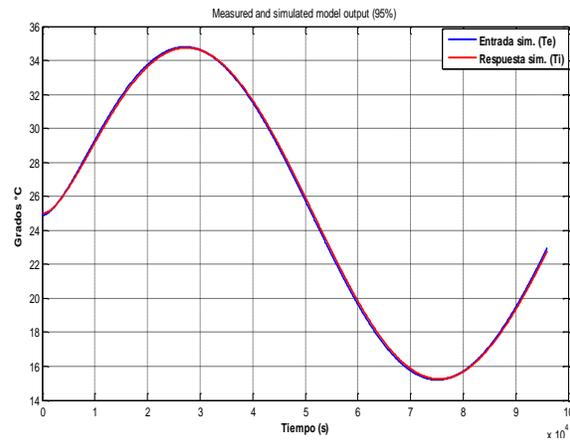


Figura 2.8b Simulación en Ident.

Tabla 2.3 Comparación de los coeficientes de función de transferencia mediante Matlab e Ident.

Plataforma de Matlab	Plataforma Ident
$G(s) = \frac{1}{2.41e^5 S^2 + 3215 S + 1}$	$G(s) = \frac{1}{2.39e^5 S^2 + 3230 S + 1}$

En la **Tabla 2.4** se muestra la desviación entre los coeficientes de la función de transferencia obtenidos de cada plataforma. El CFT₁ presentó una desviación de 0.8% y para el CFT₂ una desviación de 0.46%.

Tabla 2.4 Desviación de los coeficientes de función de transferencia.

Prueba	CFT ₁	CFT ₂	Desviación CFT ₁	Desviación CFT ₂
Matlab	2.41e ⁵	3215	0.8%	0.46%
Ident	2.39e ⁵	3230		

Una vez conocidos los coeficientes de la función de transferencia y el valor propuesto de la conductividad térmica λ_f , es posible obtener el valor del calor específico. En la **Tabla 2.5** se muestran los valores del calor específico equivalente obtenidos con diferentes plataformas.

Tabla 2.5 Valores del C_{p_f} equivalente a partir de los coeficientes de función de transferencia.

Prueba	C_{p_f} CFT ₁	C_{p_f} CFT ₂
Matlab	1570	1570
Ident	1560	1580

Capítulo 3

Diseño experimental

En este capítulo se presenta el equipo experimental, la construcción de la cavidad de prueba y la instrumentación. Adicionalmente, se presenta la metodología para la realización de las pruebas y la identificación de los parámetros térmicos de la cavidad de foamular®.

3.1 Muestreo.

La muestra es un módulo a escala, con forma de cavidad, hecha con un material con propiedades conocidas. Para esto, se utilizó una cavidad fabricada de poliestireno extruido de 5.08 cm de espesor (foamular® 250) con conductividad térmica de 0.02379 W/m°C. La cavidad se selló para evitar infiltraciones. La cavidad tiene medidas de 42x42x43 cm, tapa removible, como se muestra en la **Figura 3.1a**, además, toda la superficie tiene recubrimiento con pintura blanca.

Dentro de la cavidad, se tiene un hilo con masa térmica despreciable que sirve como soporte para las masas que se agregan en el experimento. Las masas añadidas al centro de la cavidad son de 0.5 kg de aluminio y 1.3 kg de cobre en forma de paralelepípedo rectángulo. En la **Figura 3.1b** se muestra las diferentes masas utilizadas.

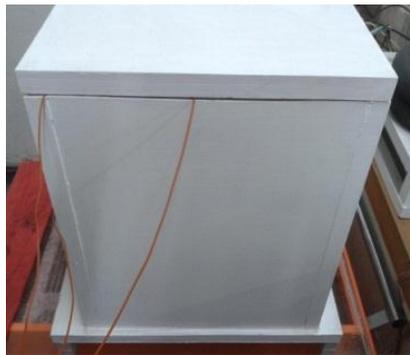


Figura 3.1a Cavidad de foamular®.

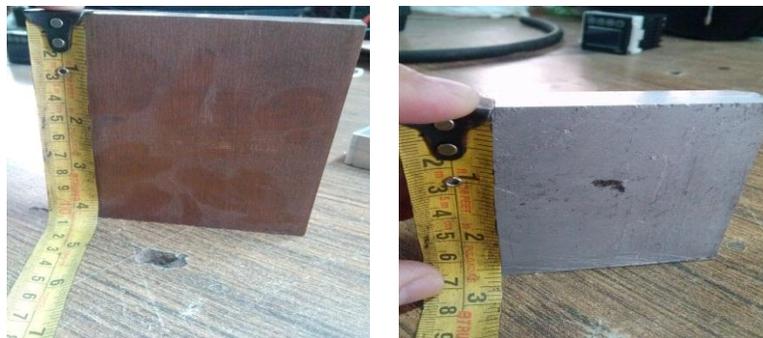


Figura 3.1b Muestras de las masas al interior.

La campaña experimental se realizó de Noviembre 2014 a Marzo de 2015. La muestra se colocó en condiciones de temperatura de laboratorio. Los alrededores de la envolvente en estudio se dispusieron con placas de poliestireno expandido (emisividad~0.82) y madera barnizada (emisividad~0.9), a una distancia mayor que 2 m.

3.2 Modelo experimental.

El experimento permite determinar el calor específico equivalente del foamular® (C_{pf}) y validar el modelo matemático, basándose en la determinación de las temperaturas $T_e(t)$, $T_i(t)$, $T_{pm}(t)$, $T_{pe}(t)$ y $T_{pi}(t)$ en pasos de tiempo especificados, y variando la masa en el interior de la cavidad a intervalos especificados.

En la **Figura 3.2** se presenta el diagrama del modelo experimental con el que se obtienen las temperaturas. Las temperaturas $T_e(t)$, $T_i(t)$, $T_{pm}(t)$, $T_{pe}(t)$, y $T_{pi}(t)$ se registran y seguido se determina la transformada en tiempo discreto $G(z)$, de acuerdo a lo expresado en la **Sección 2.3.2**. La ecuación se transforma a tiempo continuo $G(s)$ de acuerdo a lo expresado en la **Sección 2.3.1**. Con las **Ecuaciones 2.12** y **2.13**, de la forma $G(s)$ se identifica el calor específico C_{pf} .

Consideraciones generales

En el experimento la cavidad a escala se ubica bajo condiciones al interior de laboratorio, se mantiene fija la masa de la envolvente m_f y en el interior se añade una masa m_v que se varía para determinar la incertidumbre debido a diferente almacenamiento térmico de los objetos dentro de la cavidad.

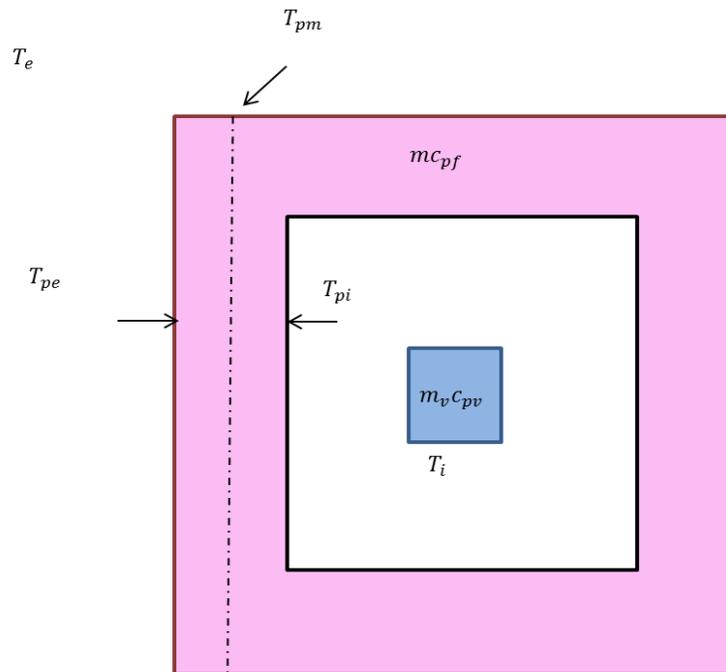


Figura 3.2 Modelo experimental.

3.3 Metodología experimental.

Durante la campaña experimental, se realizaron 15 pruebas con la cavidad de referencia sin masa al interior en periodos de 0.5-5 días, y 7 pruebas con masas variables al centro del interior en periodos de 0.5-5 días.

La metodología experimental para obtener el calor específico y la conductividad térmica equivalentes de la muestra en la cavidad se divide en dos secciones que a su vez trabajan de manera simultánea. La primera permite el ajuste de la conductividad térmica y los coeficientes de transferencia de calor. La segunda permite identificar el calor específico del foamular®, seleccionar el periodo de muestreo y la influencia en el valor C_{pf} con el cambio de masas al interior de la cavidad.

En la **Figura 3.3**, en la sección de ajuste de las h 's y λ_f , enmarcada con línea punteada azul, al inicio se debe establecer el modelo basado en circuito RC y las variables de interés, posteriormente ingresar los parámetros del material de referencia como son el calor específico, la masa al interior, el espesor y su densidad. Para la primera corrida se propone el valor de la

conductividad y los coeficientes de transferencia de calor. De manera simultánea, como se muestra en la sección 2 de experimentación enmarcada con línea punteada amarilla, se mide la temperatura exterior e interior de la cavidad y se exportan a la sección 1 para excitar el modelo a partir de T_e y generar las funciones de transferencia en tiempo continuo y discreto. Con la temperatura exterior se obtiene la temperatura interior simulada (respuesta) que es comparada con la temperatura interior experimental (respuesta).

Una vez realizada la comparación, los datos de la conductividad térmica y los coeficientes de transferencia de calor se ajustan hasta que la temperatura interior simulada y la experimental sean similares dentro de un intervalo de tolerancia, considerando únicamente un periodo de las 4:00 a 9:00 am (18000 datos en promedio).

Continuando con el procedimiento, se identifica una nueva función de transferencia a partir de los datos experimentales y con el nuevo valor de la conductividad térmica y los coeficientes de transferencia de calor es posible obtener el valor del calor específico a partir de los coeficientes de la función de transferencia. Finalmente, se calcula la desviación entre el calor específico propuesto al inicio de la corrida y el calor específico obtenido a partir de los datos experimentales. La prueba se repite siete veces para la cavidad sin masa al interior y con distintas masas al interior.

Coefficientes de transferencia de calor.

Los valores iniciales de los coeficientes de transferencia de calor se determinan con un balance de calor en cada superficie y con los valores de los diferenciales de temperatura mostrados en la **Figura 3.7**; como se muestra en el **Apéndice B**. Los valores iniciales de las h 's se corrigen con el proceso iterativo de ajuste enmarcado con línea punteada color azul.

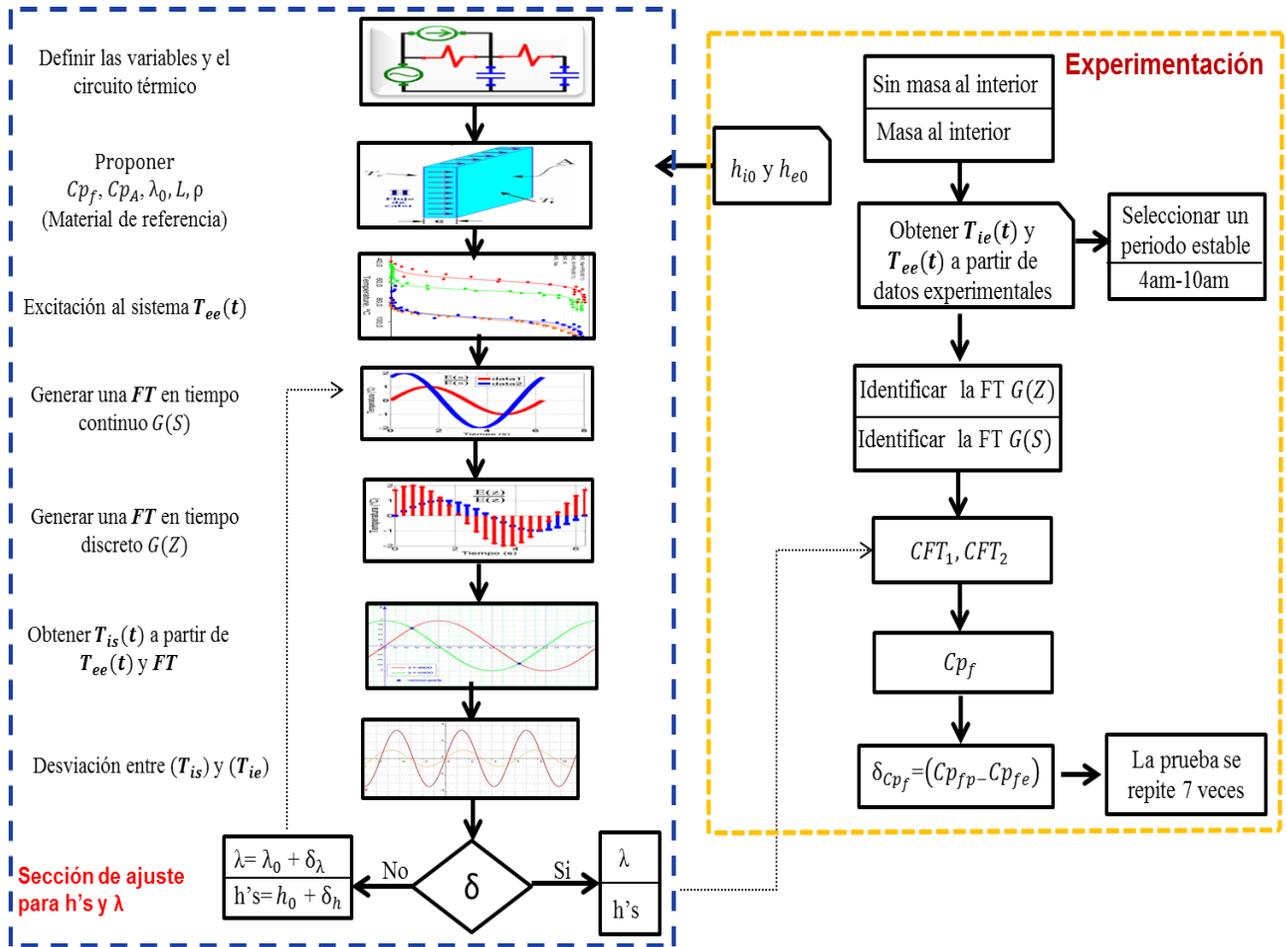


Figura 3.3 Procedimiento experimental.

3.4 Equipo experimental.

En esta sección se presenta el equipo experimental construido con base en el modelo experimental presentado en la Sección 3.1. En la Figura 3.4 se muestra el arreglo experimental. El equipo experimental está compuesto por una cavidad experimental de foamar® , una caja de zona para referenciar los sensores de temperatura, un adquisidor de datos y una PC.

La muestra o cavidad se construyó de acuerdo en lo presentado en la Sección 3.1, primero se fabricó una cavidad cúbica, posteriormente la tapa removible y la base de la cavidad y finalmente se llevó a cabo el armado y el sellado en todo su alrededor. Luego se perforó el centro de la tapa removible y se colocó un hilo sujeto del techo del laboratorio el cual soporta

la masa al centro de la cavidad. Por último se fijó la cavidad sobre la mesa y se cubrió los alrededores con poliestireno para reducir su influencia en la muestra. El sistema de adquisición de datos y la PC se utilizaron para monitorear y registrar las diferenciales de temperatura.

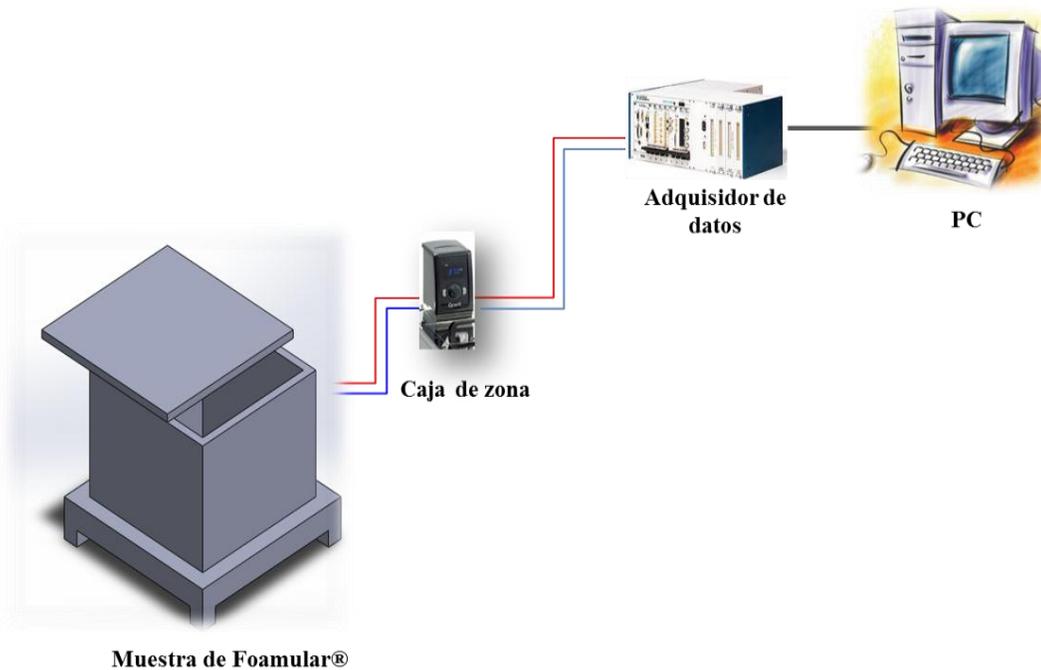


Figura 3.4 Equipo experimental.

En la **Figura 3.5** se muestran los componentes del equipo experimental y en la **Figura 3.6** se presenta el equipo experimental puesto en marcha dentro de laboratorio de Tecnología Solar. Los diferenciales de temperatura ΔT_0 , ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 , ΔT_4 y ΔT_5 se miden con termopilas, estas se colocan en cada superficie de la cavidad, al interior, al exterior y a la mitad de la pared de la cavidad. Las termopilas están fabricadas con cable cobre-constatan calibre (40) con una incertidumbre de medición de ± 0.05 , la calibración de las mismas se muestra en el **Apéndice A**. Los diferenciales de temperatura son monitoreados con el sistema de adquisición de datos NI-PXI 1050, de 16 bits y una PC para la visualización de los datos registrados.



PC



Sistema de adquisición



Muestra de foamular®

Figura 3.5 Componentes del equipo experimental.



Figura 3.6 Puesta en marcha del equipo experimental.

En la **Figura 3.7** se muestra un corte transversal de la pared donde se colocaron las termopilas. El arreglo permite la medición de la diferencia de temperatura que existe entre dos superficies.

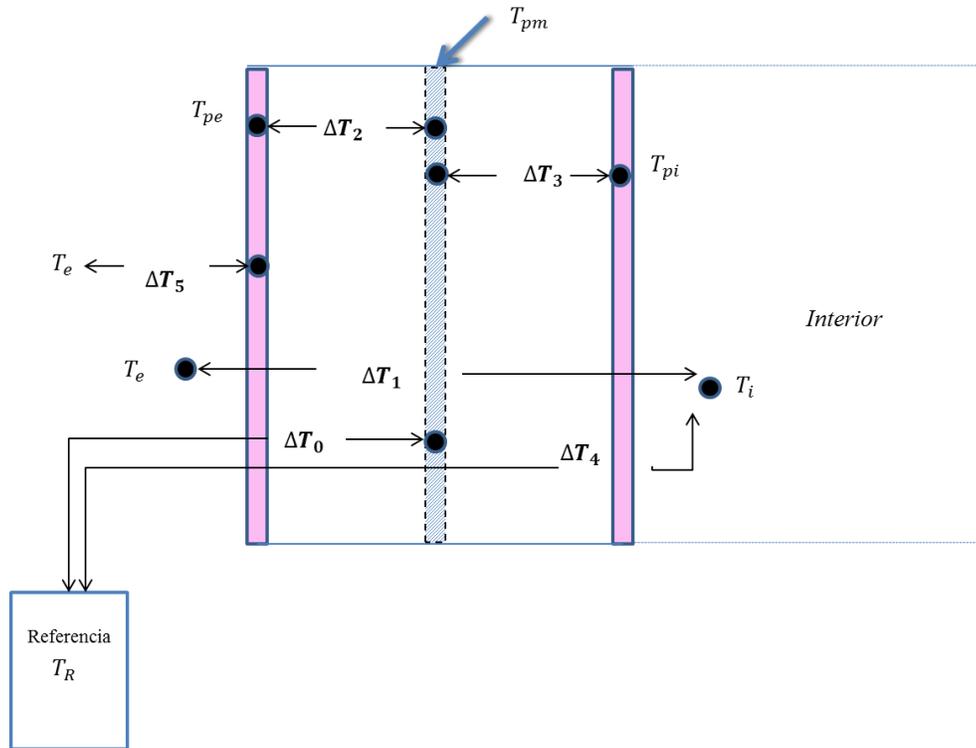
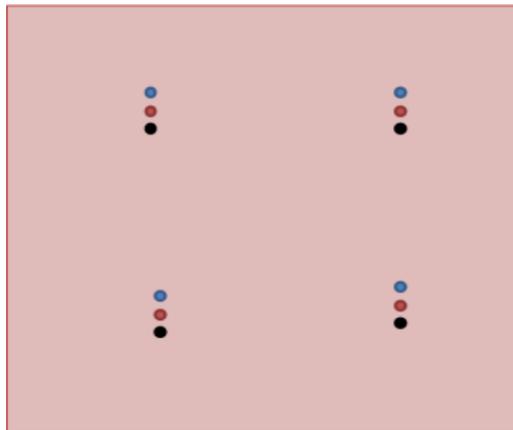


Figura 3.7 Instrumentación de las termopilas.

A lo largo y alto de la pared de la cavidad se colocaron termopilas, las puntas fueron colocadas de manera distribuida en la cara de la cavidad cómo se muestra en la **Figura 3.8** los puntos en color negro señalan su ubicación. En el experimento, se miden seis potenciales de temperatura distintos sobre la muestra. El primero ΔT_1 que considera la temperatura al exterior $T_e(t)$ y la temperatura al interior $T_i(t)$, ΔT_2 que considera la temperatura exterior de la pared $T_{pe}(t)$ y la temperatura a la mitad de la pared $T_{pm}(t)$, ΔT_3 la temperatura interior de la pared $T_{pi}(t)$ y la temperatura a la mitad de la pared $T_{pm}(t)$, ΔT_4 la temperatura interior $T_i(t)$ de la cavidad y la temperatura a la mitad de la pared $T_{pm}(t)$, ΔT_5 la temperatura de la pared $T_{pe}(t)$ y la temperatura $T_e(t)$ y finalmente ΔT_0 que contempla la temperatura de referencia $T_R(t)$ y $T_{pm}(t)$. Las temperaturas $T_e(t)$, $T_{pe}(t)$, $T_{pm}(t)$, $T_{pi}(t)$ y $T_i(t)$ se determinan con las operaciones indicadas en el **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1 Ecuaciones para determinar $T_{pm}(t), T_i(t), T_e(t), T_{pi}(t)$ y $T_{pe}(t)$.

$T_{pm}(t)$	$(T_R + \Delta T_0)$
$T_i(t)$	$(T_{pi} + \Delta T_4)$
$T_e(t)$	$(T_{pe} + \Delta T_5)$
$T_{pi}(t)$	$(T_m + \Delta T_3)$
$T_{pe}(t)$	$(T_m + \Delta T_2)$

**Figura 3.8** Distribución de puntas de las termopilas a lo largo y ancho de la pared.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización de la muestra bajo condiciones al interior en estado transitorio. En los resultados se presenta el valor identificado del calor específico de la cavidad de foamular®, considerando vacío el interior de la cavidad y con distintas masas al interior. También se presentan los resultados de la conductividad térmica a partir del ajuste en las distintas pruebas.

4.1 Determinación de condiciones de muestreo.

En el desarrollo experimental se realizaron un total de 22 pruebas, con toma de datos cada una de 0.5 a 5 días, durante los meses de Noviembre 2014 a Marzo de 2015. De las 22 pruebas se seleccionaron siete con la cavidad vacía y cuatro con masa al interior de la cavidad, los datos de las pruebas restantes presentaron cambios repentinos debidos a corrientes de aire que no fueron controladas en su momento, por lo que se omitieron.

En las pruebas sin masa al interior de la cavidad únicamente se consideró la masa total de la cavidad y la masa de aire al interior. En la **Figura 4.1** se muestra el comportamiento de las temperaturas al exterior y al interior de la cavidad en una prueba, con un periodo de dos días, donde se puede observar que la temperatura exterior presenta un valor máximo de 27.5°C y la temperatura al interior de 26.2°C . También, se puede observar que la temperatura al interior se ve influenciada por la temperatura al exterior y por su capacitancia y resistencia térmica del material de referencia que provoca el retraso y el amortiguamiento en la temperatura al interior.

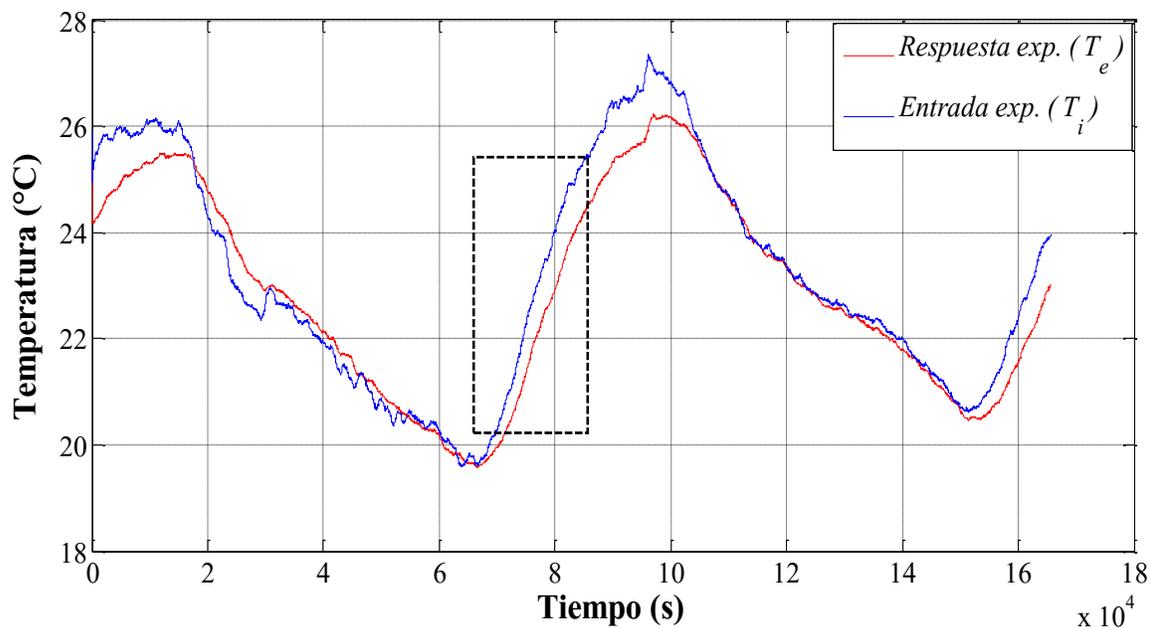


Figura 4.1 Comportamiento T_e y T_i en el primer experimento.

En los resultados se puede observar que al aplicar el modelo presentado en la **Sección 2.3** únicamente ajusta para un periodo determinado que corresponde de 4:00 a 9:00 am, 5 horas, ya que en este período las temperaturas presentaron mayor congruencia con el modelo invariante en el tiempo que se considera en este trabajo. Lo anterior en concordancia con lo observado en los valores determinados de los coeficientes de transferencia de calor tanto al exterior como al interior, que solo variaron de manera significativa de las 10:00 a 20:00 horas, en la **Figura 4.2** se muestra un gráfico representativo del comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor a lo largo de la campaña experimental.

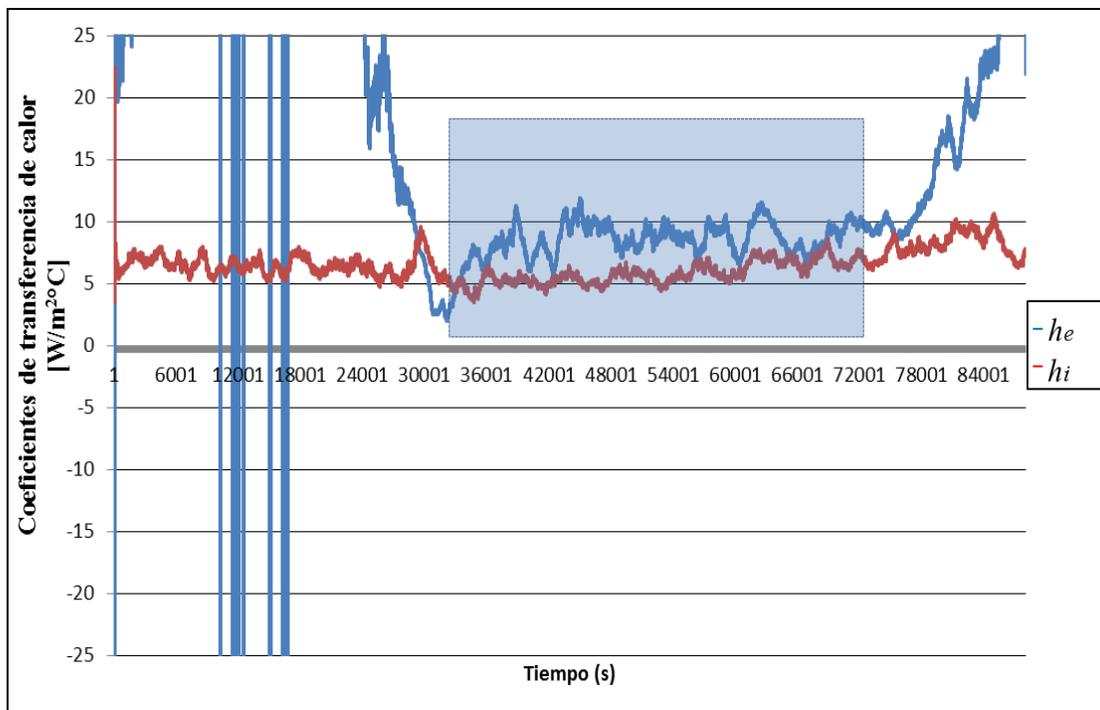


Figura 4.2 Comportamiento de h_e y h_i .

La temperatura al exterior y al interior de la cavidad presentaron tendencias semejantes tanto en el primer como en el segundo experimento, en un periodo de un día, como se puede observar al comparar la **Figura 4.1** y la **Figura 4.3a**. En este caso para un periodo de un día, también el periodo de prueba se seleccionó de 5 horas, como se indica en la **Figura 4.3a**. De

igual manera, un tercer experimento presentó un periodo de muestreo de 5 horas para cada día como se indica en la **Figura 4.3b**.

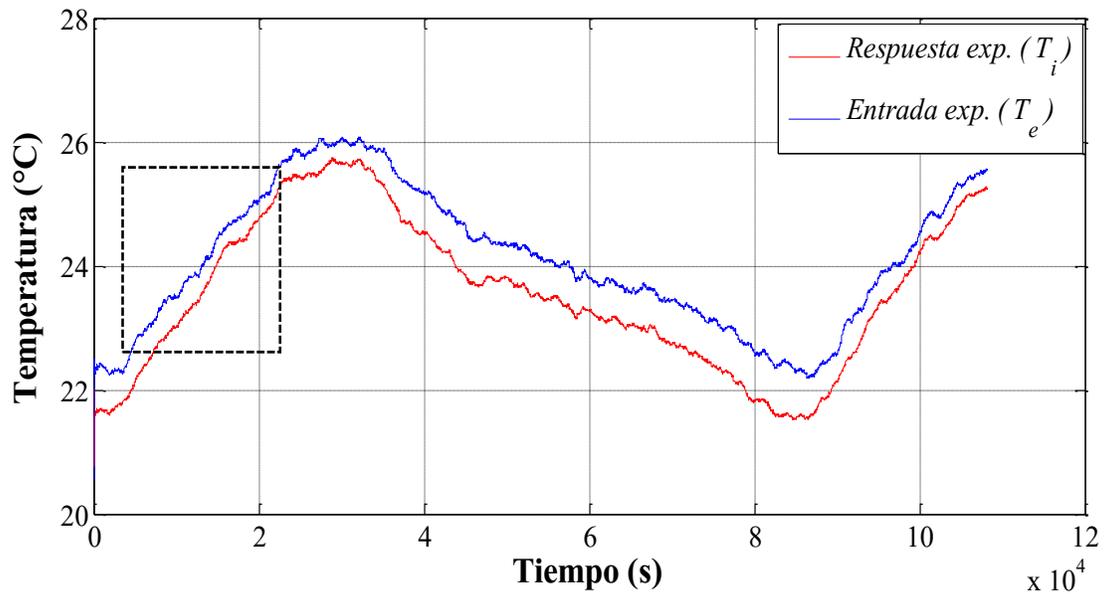


Figura 4.3a Comportamiento T_e y T_i en el segundo experimento.

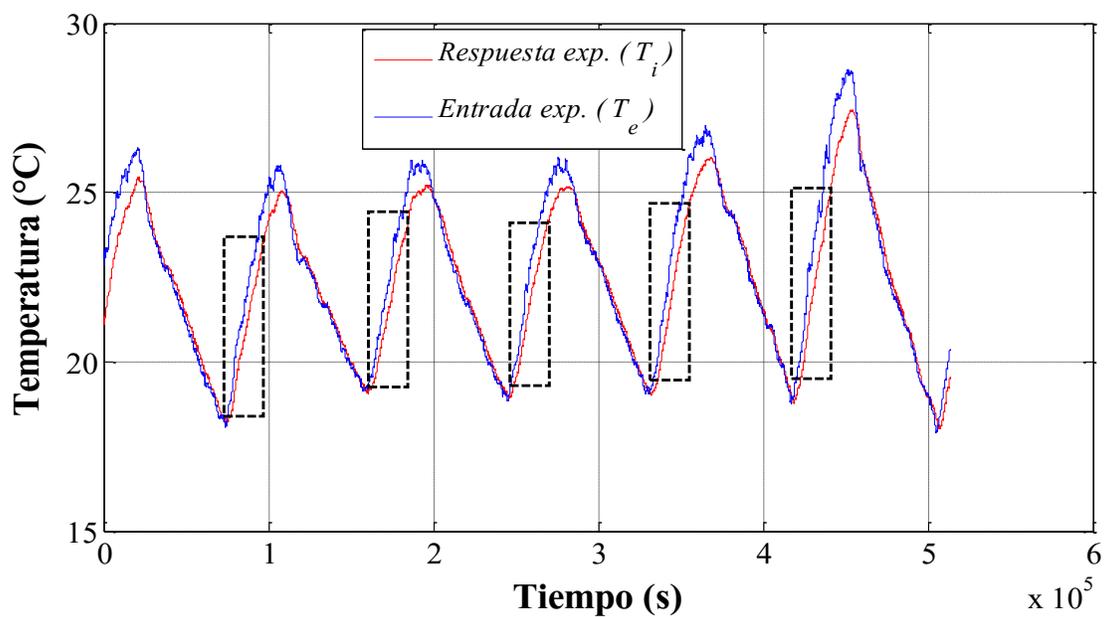


Figura 4.3b Comportamiento T_e y T_i en el tercer experimento.

4.2 Determinación de λ_f y Cp_f equivalentes.

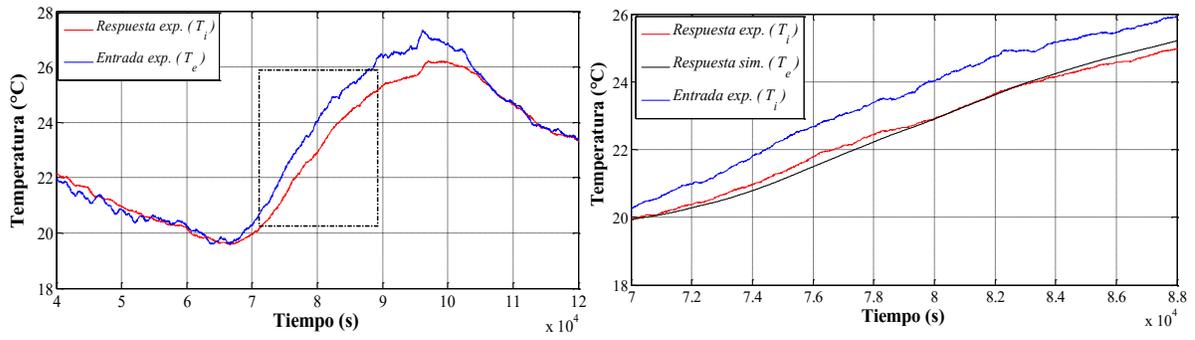
En esta sección se presentan los resultados para el calor específico y la conductividad térmica equivalentes, también los periodos seleccionados para la identificación de los parámetros y el ajuste en la reproducción de la temperatura al interior T_i .

Sin masa al interior de la cavidad.

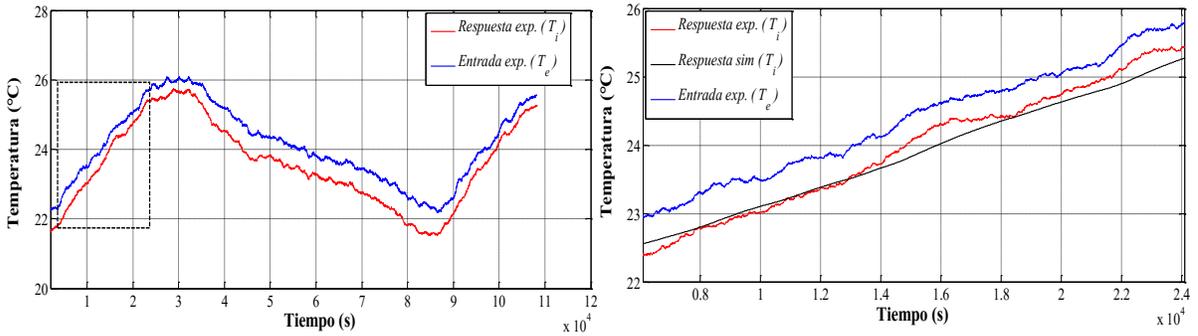
En la **Figura 4.4a** y **4.4b** se muestran los ajustes para cada prueba realizada, en la columna izquierda se muestra el respectivo periodo de datos seleccionado y en la columna derecha un acercamiento en el ajuste de las temperaturas al interior T_i experimental y simulada. Aplicando la metodología experimental presentada en la **Sección 3.3** se determinó el valor de la conductividad térmica λ_f y del calor específico Cp_f equivalentes del foamular®. El ajuste de λ_f a partir de las temperaturas al interior T_i , se logró con un RMSE promedio de 0.18°C , con un valor promedio de la conductividad térmica de $0.024 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, con una desviación porcentual de 3.30% respecto al valor reportado por el fabricante ($0.02379 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) para las siete pruebas realizadas como se muestra en la **Tabla 4.1**. En la tabla se observa que el valor de la conductividad térmica para realizar el ajuste, se mantuvo en un intervalo de 0.023 a $0.025 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

Tabla 4.1 Conductividad térmica equivalente para el primer, segundo y tercer experimento.

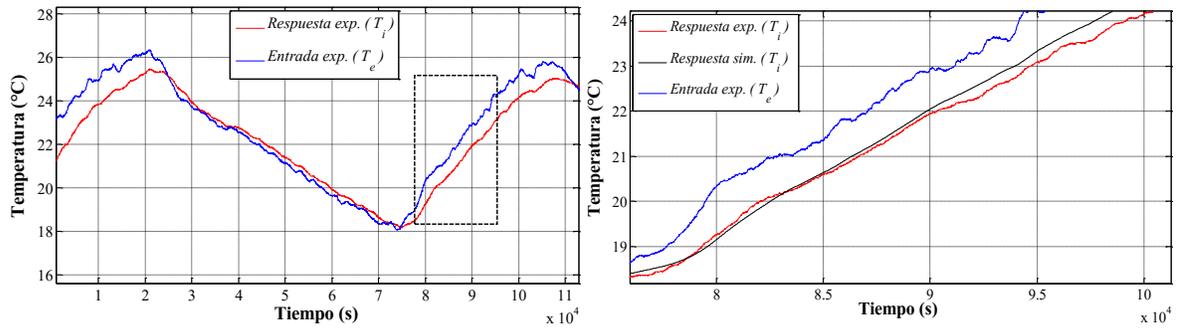
Prueba	λ_f [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]	Desviación respecto al valor de referencia
1	0.024	0.88%
2	0.023	3.32%
3	0.025	5.08%
4	0.0235	1.21%
5	0.025	5.08%
6	0.0248	4.24%
7	0.023	3.32%
<i>Promedio</i>	<i>0.024</i>	<i>3.30%</i>



Prueba 1

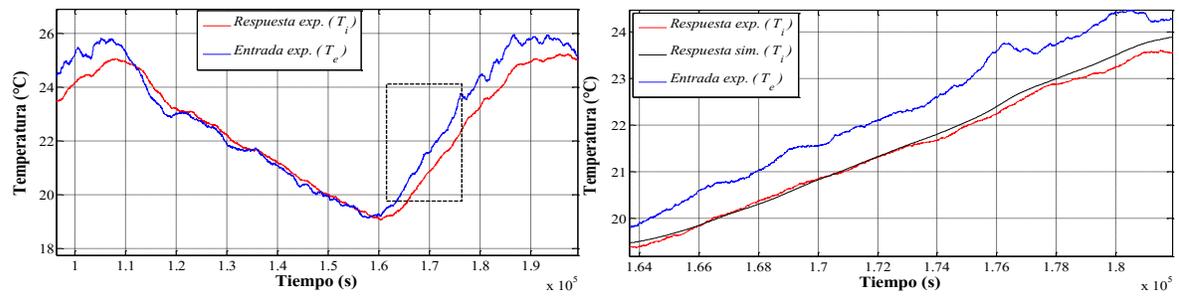


Prueba 2

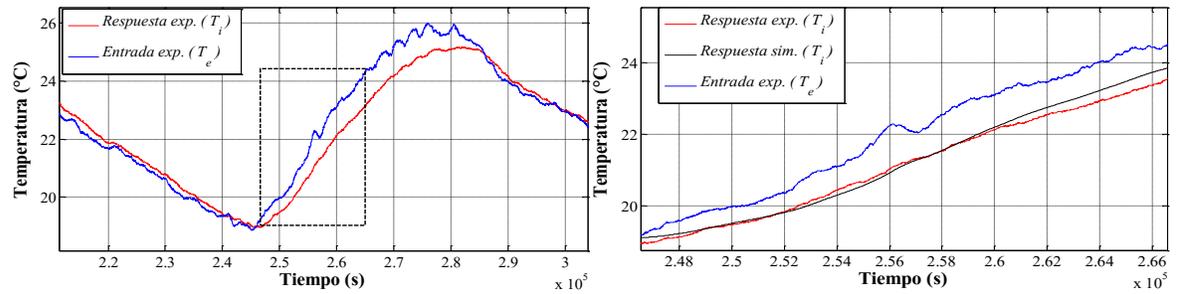


Prueba 3

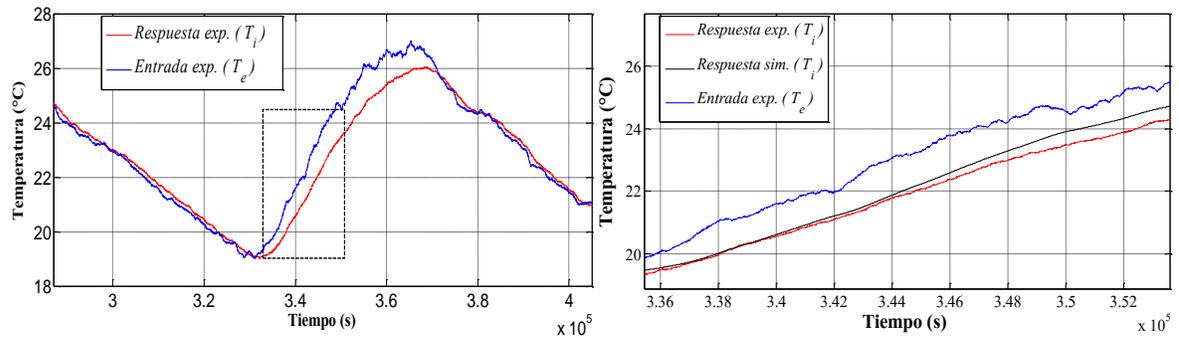
Figura 4.4a Ajuste de la temperatura experimental al interior y la temperatura al interior obtenida a partir de las funciones de transferencia para la prueba de la uno a la tres.



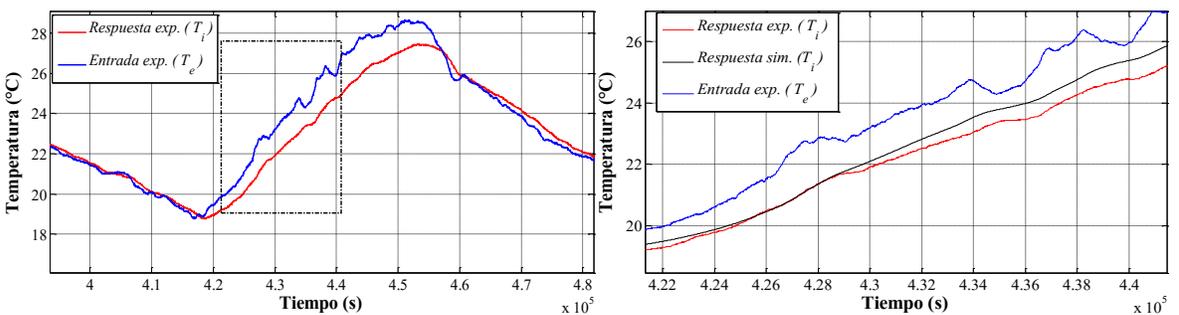
Prueba 4



Prueba 5



Prueba 6



Prueba 7

Figura 4.4b Ajuste de la temperatura experimental al interior y la temperatura al interior obtenida a partir de las funciones de transferencia para la prueba de la cuatro a la siete.

En la **Tabla 4.2** se muestran los valores del calor específico identificado para cada prueba y la desviación porcentual tomando como valor de referencia 1715 J/kg°C. El valor del C_{pf} promedio fue de 1593 J/kg°C (capacitancia térmica equivalente promedio 2487 J/°C) y se obtuvo con el CFT_1 debido a que éste implica una variable de segundo orden y por consiguiente es más sensible.

Tabla 4.2 Calor específico equivalente considerando la cavidad vacía.

Prueba	CFT_1 C_{pf} [J/kg°C]	Desviación respecto al valor de referencia
1	1585	7.51%
2	1570	8.45%
3	1556	9.27%
4	1620	5.53%
5	1533	10.61%
6	1649	3.84%
7	1637	4.54%
<i>Promedio</i>	<i>1593</i>	<i>7.10%</i>

La desviación de los valores se atribuye al carácter del modelo utilizado, que implica invariabilidad en el tiempo y a las variaciones de los coeficientes de transferencia de calor que se consideraron en el ajuste de λ_f . También es de observar que en este trabajo tanto el C_{pf} como λ_f se consideran invariantes respecto a la temperatura.

Con masa al interior de la cavidad

En la **Figura 4.5** se muestra el comportamiento de las temperaturas al exterior y al interior de la cavidad para un periodo de dos días, donde se puede observar que la temperatura exterior tuvo un valor máximo de 25.3°C y la temperatura al interior de 24.0°C. De igual manera se seleccionó un periodo de 5 horas (4 a 9 am) para llevar a cabo la identificación de calor específico y el ajuste de la conductividad térmica equivalentes, el resto de los datos se

discriminaron debido a que las temperaturas presentaron cambios bruscos después del periodo seleccionado.

En la figura se observa que el comportamiento de las temperaturas no es afectado de manera considerable al incluir una masa al interior de la cavidad, más sin embargo, el valor del calor específico del foamular® (C_p) si es afectado en un 2.32% al compararlo con el valor obtenido sin masa al interior, esto debido a que se considera una mayor capacitancia térmica al interior de la cavidad.

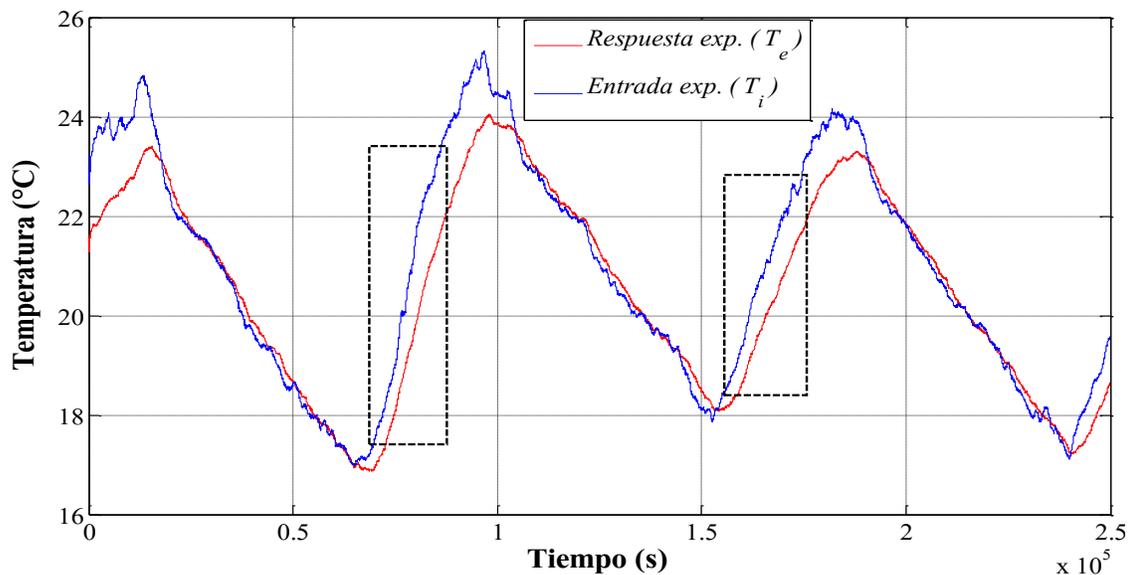


Figura 4.5 Comportamiento T_e y T_i en el cuarto experimento.

En la **Figura 4.6** se muestra el ajuste del periodo de datos seleccionados para cada prueba realizada. La reproducción de la temperatura al interior simulada con la experimental presentó un RMSE promedio de 0.195°C y un valor de la conductividad térmica promedio de $0.0235\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, como se muestra en la **Tabla 4.3**. En los resultados de la conductividad térmica equivalente se observó que el valor obtenido para la prueba uno y dos se desvía 0.45% respecto al valor reportado por el fabricante. La desviación se atribuye a la diferencia de los

métodos utilizados. En este trabajo se realizó un estudio en estado transitorio y los valores reportados por el fabricante se obtienen de un método en estado permanente.

Tabla 4.3 Conductividad térmica equivalente para el cuarto experimento.

Prueba (Masa al interior)	λ_f [W/m°C]	Desviación respecto al valor de referencia
1	0.024	0.88%
2	0.023	0.03%
Promedio	0.0235	0.45%

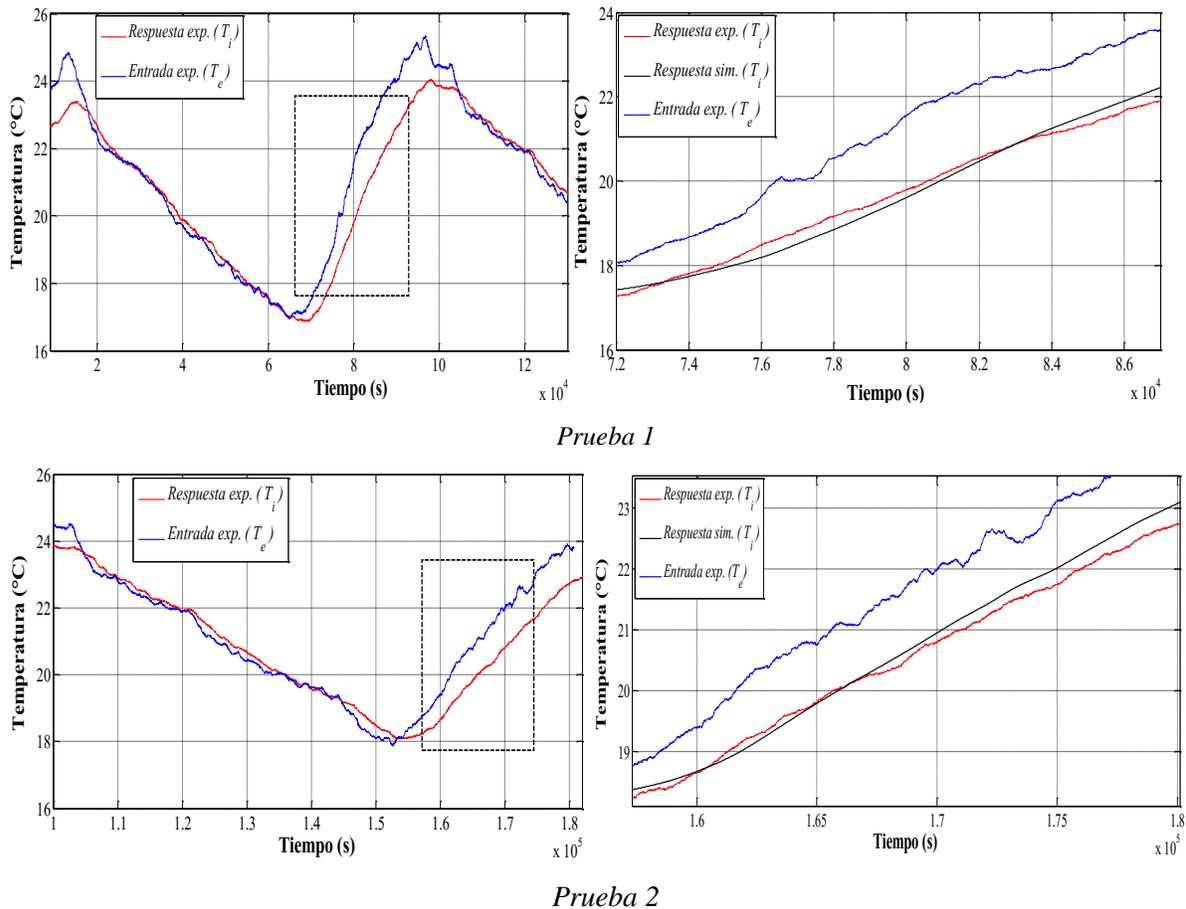


Figura 4.6 Ajuste de la temperatura experimental al interior y la temperatura al interior obtenida a partir de las funciones de transferencia para el cuarto experimento.

En la **Tabla 4.4** se muestran los valores del calor específico identificado para cada prueba y la desviación porcentual tomando como valor de referencia $1593 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, que fue obtenido de las pruebas considerando la cavidad vacía. El valor del C_{p_f} promedio fue de $1630 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ (capacitancia térmica equivalente promedio $2520 \text{ J/}^\circ\text{C}$). Se puede observar que el valor del C_{p_f} varió únicamente $4 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ entre las dos pruebas realizadas considerando la masa de 1.3 kg , la variación del valor del C_{p_f} se atribuye a los diferentes almacenamientos de energía en la masa de la cavidad y en la masa adicionada al interior

Tabla 4.4 Calor específico equivalente considerando 1.3 kg al interior de la cavidad.

Prueba	CFT ₁ $C_{p_f} [\text{J/kg}^\circ\text{C}]$	Desviación respecto al valor de referencia
1	1632	2.44%
2	1628	2.19%
<i>Promedio</i>	<i>1630</i>	<i>2.31%</i>

En la **Figura 4.7** se muestra el comportamiento de las temperaturas al exterior y al interior de la cavidad para un periodo de dos días, se puede observar que la temperatura exterior tuvo un valor máximo de 26.5°C y la temperatura al interior de 25.8°C . En este experimento se consideró una masa de aluminio de 0.5 kg y diferentes coeficientes de transferencia de calor como se presenta en el **Apéndice B**. Se observa que el comportamiento de las temperaturas presentó semejanza cualitativa a los resultados de las pruebas anteriores.

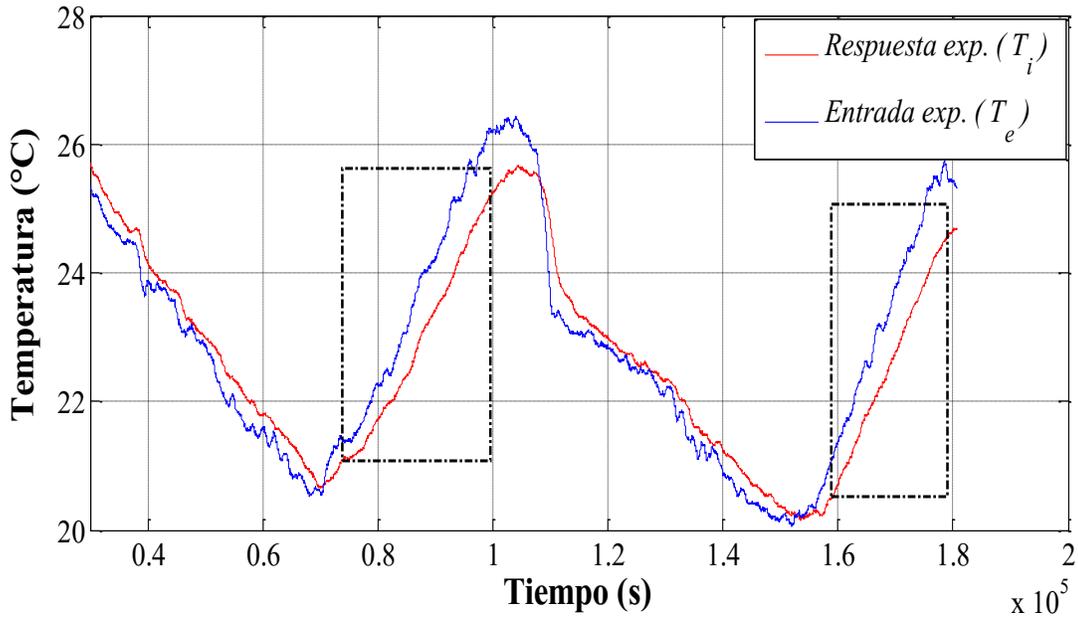
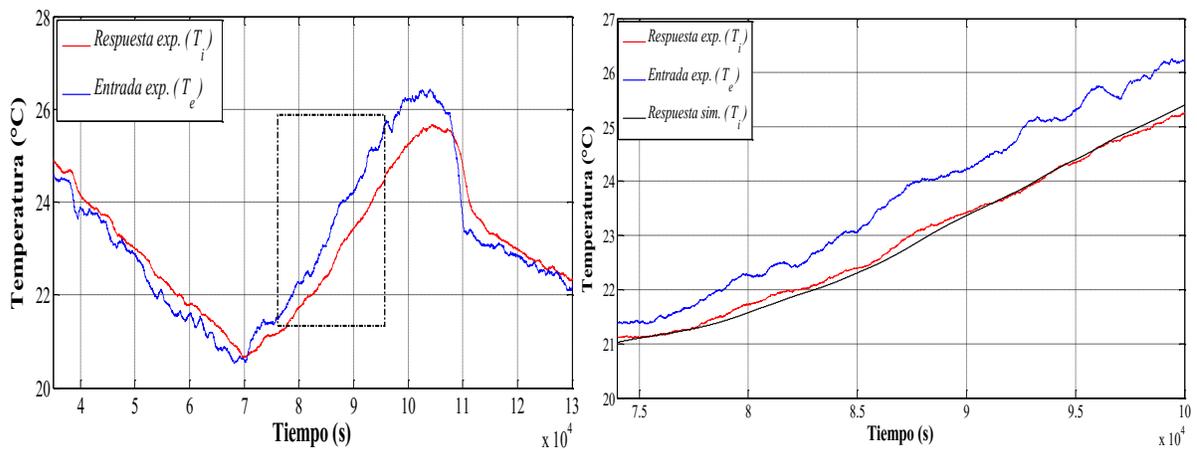


Figura 4.7 Comportamiento T_e y T_i en el quinto experimento.

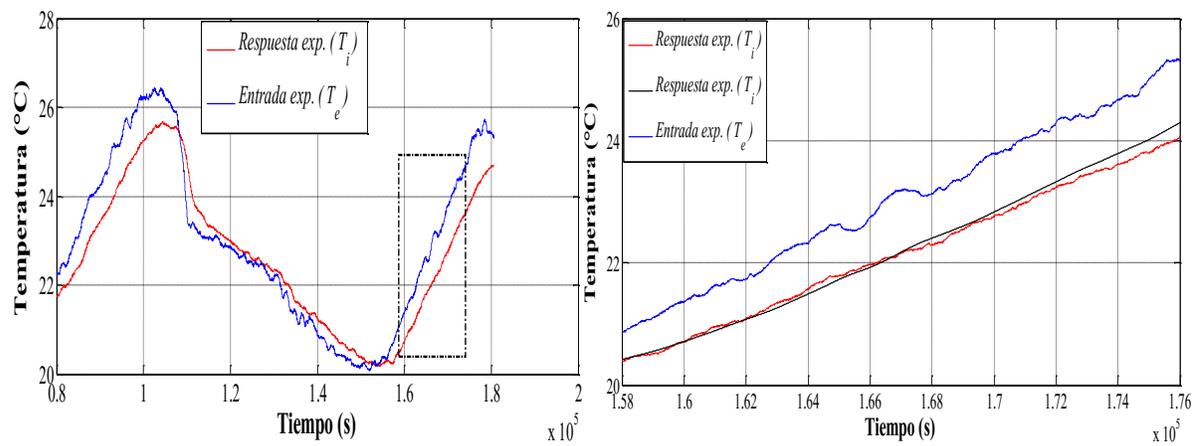
En la **Figura 4.8** se muestra el ajuste del periodo de datos seleccionados para cada prueba. La reproducción de la temperatura al interior simulada con la experimental presentó un RMSE promedio de 0.095°C y un valor de la conductividad térmica promedio de $0.024 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, como se muestra en la **Tabla 4.5**. Para este caso la conductividad térmica se desvía en un 0.05% en comparación de la prueba que considera una masa de 1.3 kg.

Tabla 4.5 Conductividad térmica equivalente para el quinto experimento.

Prueba (Masa al interior)	λ_f [$\text{W/m}^{\circ}\text{C}$]	Desviación respecto al valor de referencia
3	0.025	5.0%
4	0.023	3.32%
<i>Promedio</i>	<i>0.024</i>	<i>4.16%</i>



Prueba 3



Prueba 4

Figura 4.8 Ajuste de la temperatura experimental al interior y la temperatura al interior obtenida a partir de las funciones de transferencia para el quinto experimento.

En la **Tabla 4.6** se muestran los valores del calor específico identificado para las pruebas con masa cambiante y la desviación porcentual tomando como valor de referencia 1593 J/kg°C considerando el valor obtenido de la prueba con la cavidad vacía. El valor promedio obtenido del C_{pf} fue de 1626 J/kg°C (capacitancia térmica equivalente promedio 2513 J/°C). En este caso el valor del calor específico disminuyó 4 J/kg°C al considerar la masa de 0.5 kg con respecto al reportado en la **Tabla 4.5**.

Tabla 4.6 Calor específico equivalente considerando 0.5 kg al interior de la cavidad.

Prueba	CFT₁ C_{p_f} [J/kg°C]	Desviación respecto al valor de referencia
3	1620	1.69%
4	1632	2.44%
Promedio	1626	2.06%

Las desviaciones encontradas para la conductividad térmica equivalente cuando se agrega masa en el interior implican adición en la incertidumbre en la determinación del C_{p_f} de la componente. El cambio en los valores del C_{p_f} se atribuye al contenido de masa y a sus propiedades termofísicas que permiten almacenamiento de calor adicional que no se consideran en el modelado.

En la **Figura 4.9** se muestra un comparativo del C_{p_f} obtenido en el presente trabajo para las diferentes pruebas considerando la influencia de la masa al interior de la cavidad. Para este caso, la conductividad térmica se mantuvo en un valor promedio de 0.024 W/m°C, mientras que el calor específico presentó un incremento a medida que se le adicionó masa en el interior de la muestra. Se puede observar que al tener una masa al interior de la cavidad de 0.5 kg (32% de la masa de la cavidad) el C_{p_f} aumenta 33 J/kg°C, y cuando la masa es de 1.3 kg (83% de la masa de la cavidad) el incremento fue de 37 J/kg°C, tomando como valor obtenido 1593 J/kg°C en las pruebas con la cavidad vacía.

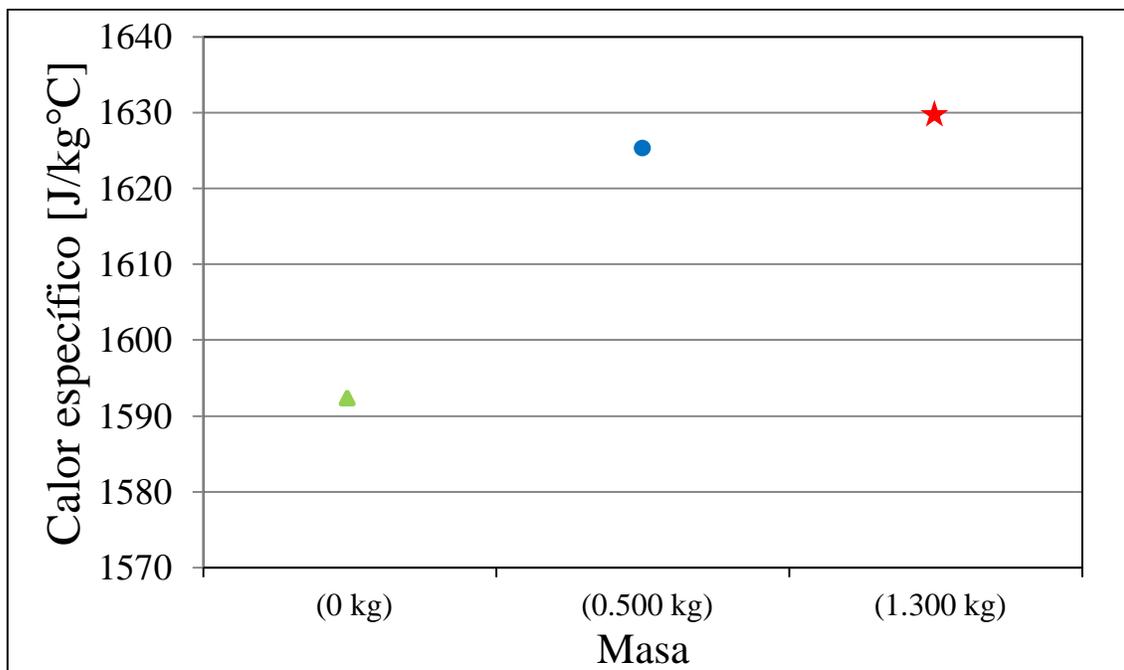


Figura 4.9 Comparativo del Cp_f considerando la influencia de masa al interior.

Considerando la metodología experimental presentada en la **Sección 3.2**, fue posible determinar el valor de la conductividad térmica mediante el ajuste de la temperatura experimental al interior y la temperatura al interior obtenida de la funciones de transferencia. Se pudo observar que para valores de la conductividad térmica mayores a $0.026 W/m^{\circ}C$, no fue posible reproducir un ajuste adecuado de las temperaturas al interior, únicamente se pudo ajustar en un intervalo de 0.023 a $0.025 W/m^{\circ}C$, esto se atribuye al modelo invariante en el tiempo utilizado, debido a que únicamente considera a las variables en un periodo estable.

4.3 Comparación de Cp_f y λ_f con trabajos previos.

En esta sección se presenta una comparación de los valores obtenidos para el calor específico equivalentes con trabajos previos.

4.3.1 Calor específico equivalente.

En la **Figura 4.10** se muestra un comparativo del Cp_f obtenido en el presente trabajo con diferentes valores reportados. Se puede observar que el intervalo de valores reportados para el Cp_f es de 1280 a 2680 J/kg°C, en promedio 1715 J/kg°C, valor que se toma como referencia. En el presente trabajo se obtuvo un valor promedio del Cp_f de 1593 J/kg°C para las pruebas considerando la cavidad vacía en su interior. El valor obtenido en este trabajo se observa que se encuentra dentro del intervalo de valores reportados por diferentes autores.

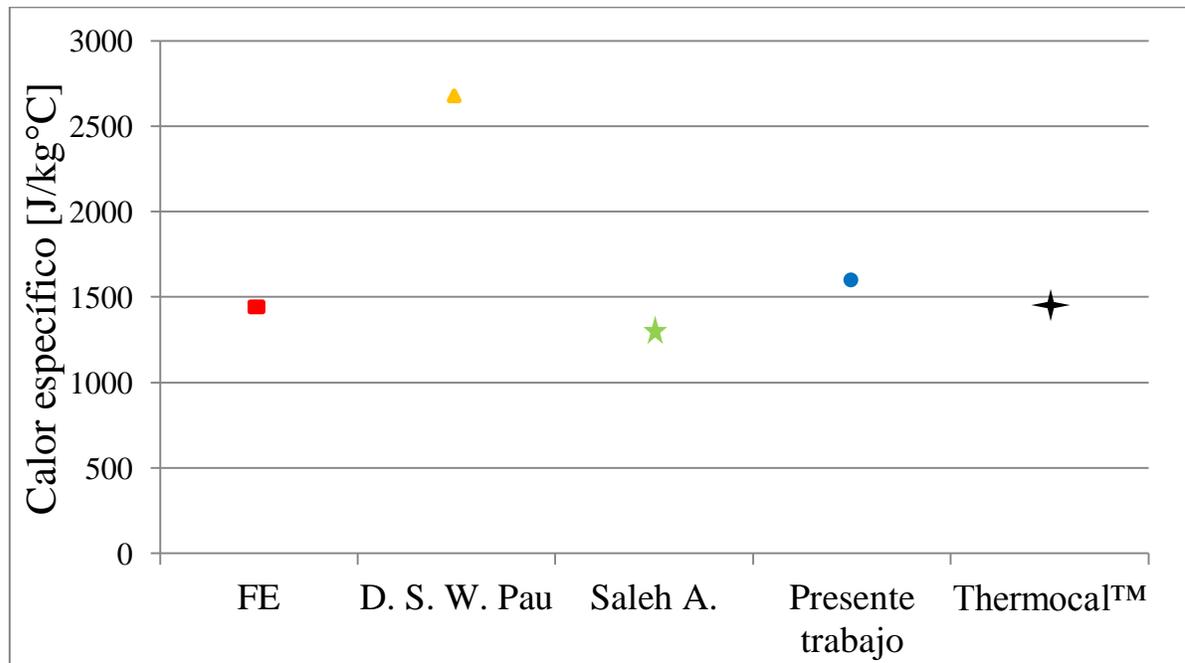


Figura 4.10 Comparativo del Cp_f con trabajos previos.

4.3.2 Conductividad térmica equivalente.

En la **Figura 4.11** se muestra un comparativo de la conductividad térmica equivalente obtenida en el presente trabajo con diferentes valores reportados. Se puede observar que el valor de la conductividad térmica se encuentra en un intervalo de 0.0237 a 0.031 W/m°C, en

este trabajo se reporta un valor promedio de la conductividad térmica equivalente de 0.024 W/m°C que se encuentra dentro de los valores reportados.

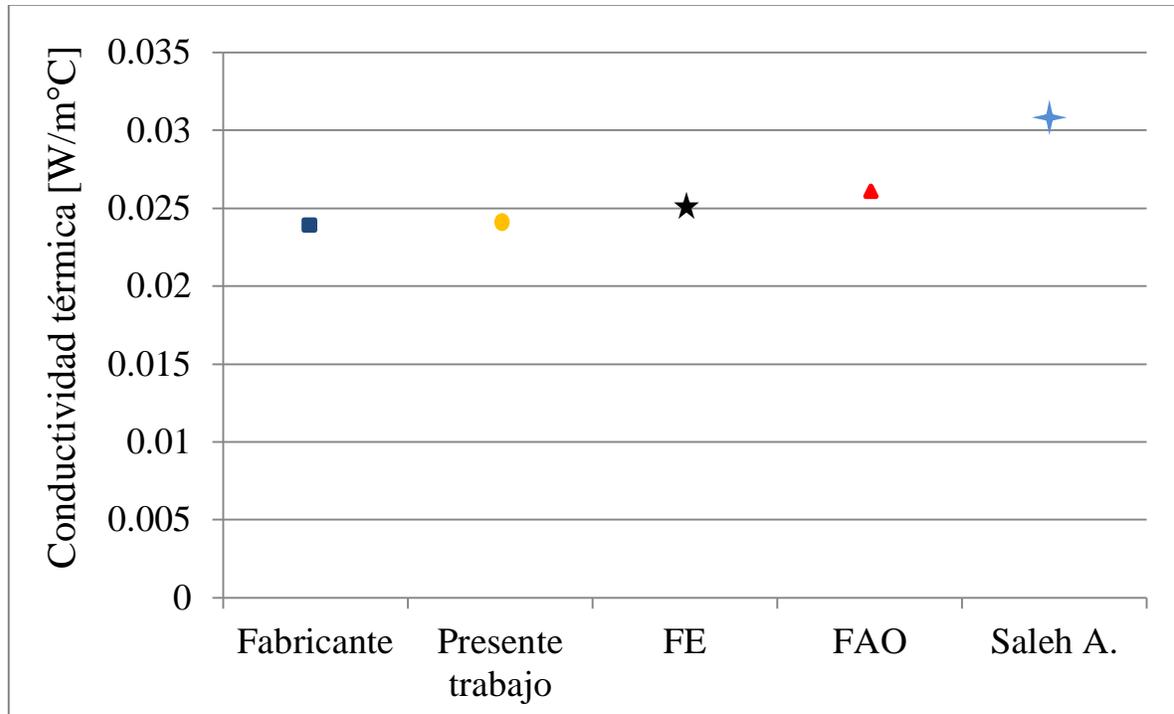


Figura 4.11 Comparativo de λ_f con trabajos previos.

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 desarrolló una metodología para identificar el Cp_f y λ_f equivalentes de una muestra de foamular®, con sus respectivas incertidumbres, utilizando un modelo RC invariante en el tiempo que se resuelve mediante funciones de transferencia. También, la metodología permitió determinar la incertidumbre que puede generar una masa al interior de la cavidad.
2. En el desarrollo de la metodología se utilizó como muestra de referencia una cavidad de foamular®, con propiedades conocidas, bajo condiciones de laboratorio. La metodología permitió determinar el Cp_f con una desviación de 7.10% respecto al promedio de los valores reportados, y la λ_f con una desviación promedio de 3.30% respecto al valor reportado por el fabricante.
3. El valor del calor específico equivalente de la muestra de foamular® obtenido en este trabajo fue de 1593 J/kg°C, considerando como referencia el valor promedio reportado $Cp_f=1715$ J/kg°C. La conductividad térmica λ_f promedio fue de 0.024 W/m°C.
4. El valor del Cp_f resultó ligeramente diferente al adicionar masa en el interior de la muestra, adicionando 0.5 kg el valor obtenido se incrementó en 2.06% (33 J/kg°C), mientras que adicionando 1.3 kg, el incremento fue de solo 2.31 % (37 J/kg°C).
5. En el desarrollo de los experimentos se encontró que el modelo RC invariante en el tiempo utilizado, solo fue aplicable para ciertos periodos a lo largo del día, que fue de las 4 a 9 am. Bajo esta observación se definieron los periodos de muestreo durante los experimentos.

5.2 Recomendaciones para trabajo futuros.

1. Establecer un modelo RC variante en el tiempo con el fin de evaluar un periodo más largo considerando la variación de los coeficientes de transferencia de calor, para reducir incertidumbres en el cálculo de Cp_f y λ_f en periodos diarios.
2. Realizar sesiones de pruebas paralelas para identificar con menor incertidumbre la influencia del cambio de masa en el interior de la muestra.
3. Extender al estudio a muestras de mayor escala y obtener relaciones entre tamaños de muestras, con el fin de hacer las correcciones pertinentes del Cp_f equivalente por escalamiento.
4. Aplicar la metodología propuesta para la identificación del Cp_f equivalente en envolventes considerando diferentes materiales, como lo son los no homogéneos.

Bibliografía

1. Asan H., 2005, Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials, *Building and Environment*, 41: 615–620.
2. Ávila E. R., Islas G. C., 1994, Overview: Why Reduce Energy Consumption?; presented in A Training Workshop on Energy Efficiency in Buildings in Mexico.
3. Baker P.H., 2008, Evaluation of round-robin testing using the PASLINK test facilities, *Building and Environment*, 43: 181–188.
4. Baker P.H., Van Dijk H. A. L., 2008, PASLINK and dynamic outdoor testing of building components, *Building and Environment*, 43: 143–151.
5. Balocco C., Grazzini G., Cavallera A., 2008, Transient analysis of an external building cladding, *Energy and buildings*, 40:1273-1277.
6. Burch D. M., Zarr R. R., Licitra B. A., 1990, A Dynamic Test Method for Determining Transfer Function Coefficients for a Wall Specimen Using a Calibrated Hot Box, Insulation Materials, Testing, and Applications, ASTM STP 1030, D. L. McElroy and J. F. Kimpfen, Eds., *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia : 345-361.
7. Castillo R., 2010, *Evaluación del desempeño térmico de componentes de edificaciones y su medición de temperatura utilizando interferometría homodina*, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, CENIDET-SEP, Cuernavaca, Morelos.
8. CONNUE, 2011, Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Visitado en Mayo 16, 2014. URL: http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/espacio_aparatos
9. Collins M., 2004, The importance of indoor and outdoor air-film coefficient measurement to solar calorimeter, *SESCI 2004 Conference University of Waterloo*, Waterloo, Ontario, Canada August 21st-25th.
10. Dorft C., Bishop H., *Sistemas de control moderno*, 10ª Edición, Pearson Educación, Madrid, 2005. Pp. 47.
11. Fanhong K., Qunli Z., 2010, Effect of heat and mass coupled transfer combined with freezing process on building exterior envelope, *Energy and Buildings*, 62: 486-495.

12. FAO CORPORATE DOCUMENT REPOSITORY. Visitado en Octubre 10, 2014.
URL: <http://www.fao.org/docrep/006/y5013e/y5013e08.htm>
13. Federation of European rigid polyurethane foam associations. Visitado en Octubre 10, 2014. URL: <http://www.buildup.eu/links/74>
14. Fraisse G., Viardot C., Lafabrie O., Achard G., 2002, Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy, *Energy and Buildings*, 34: 1017-1031.
15. Galindo L.M. (coordinador), 2009, La economía del cambio climático en México, Secretaria de Hacienda y Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
16. Ghiaus C., Hazyuk I., 2010, Calculation of optimal thermal load of intermittently heated building, *Energy and Building*, 42: 1248-1258.
17. Gong Y., Huang K., 2006, Comparison of Dynamic Data Analysis Methods for Thermal Property Measurement of a Building Wall, *Envelope Technologies for Building Energy Efficiency*, Vol.II-1-3.
18. International Organization for Standardization, ISO 11357:2005(E), *Plastics—Differential scanning calorimetry (DSC) — Part 4: Determination of specific heat capacity*, First edition 2005-09-15, 2005.
19. Insolate térmico de poliestireno extrudado. Visitado en Octubre 10, 2014.
URL: <http://www.gbcbrasil.org.br/sistema/docsMembros/0910131110500000007171.pdf>
20. Jiménez M.J, Madsen H., Andersen, K.K., 2008, Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB, *Building and Environment*, 43: 170–180.
21. 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.
22. Jin X., Zhang X., Cao Y., Wang G., 2012, Thermal performance evaluation of the wall using heat flux time lag and decrement factor, *Energy and Buildings*, 47: 369–374.
23. Kossecka E., Kosny J., 2004, Three-dimensional conduction z-transfer function coefficients determined from the response factors, *Energy and Buildings*, 37: 301–310.

24. Krüger E. L., Adriazola M., 2010, Thermal analysis of wood-based tests cells, *Construction and Building Materials*, 24: 999–1007.
25. Macías-Melo, 2008, *Implementación de Experimentos para la Calibración de Termopares Mediante Comparación con PTR*, Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, CENIDET-SEP, Cuernavaca, Morelos.
26. Macías M., 2013, *Evaluación Térmica Transitoria de Componentes de Edificaciones Mediante Pruebas al Exterior Variando los Coeficientes Convectivos*, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, CENIDET-SEP, Cuernavaca, Morelos.
27. Mavromatidis E., Bykalyuk A., Lequay H., 2012, Development of polynomial regression models for composite dynamic envelopes' thermal performance forecasting, *Applied Energy* 104: 379–391.
28. NOM-C-008-ENER: *Eficiencia energética en edificaciones, envoltentes de edificios no residenciales*, Norma Oficial Mexicana, Diario Oficial, México, 2001.
29. NOM-C-018-ENER: *Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba*. Norma Oficial Mexicana, Diario Oficial, México, 2011.
30. NOM-C-020-ENER-2011: *Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios para uso habitacional*. Norma Oficial Mexicana, Diario Oficial, México, 2011.
31. NOM-C-024-ENER-2012: *Características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidriados para edificaciones, etiquetado y métodos de prueba* Norma Oficial Mexicana, Diario Oficial, México, 2012.
32. Palyvos J.A., 2007, A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling, *Applied Thermal Engineering*, 28: 801–808.
33. Pau D.S.W., Fleischmann C. M., Spearpoint, M. J. and Li, K. Y., 2014, Thermophysical properties of polyurethane foams and their melts, *Fire Mater* 38: 433–450.
34. Peizheng M., Lin-Shu W., 2011, Effective heat capacity of exterior Planar Thermal Mass (ePTM) subject to periodic heating and cooling, *Energy and Buildings*, 47: 394–401.

35. Pisello A., Goretti M., Cotana F., 2012, A method for assessing building's energy efficiency by dynamic simulation and experimental activity, *Applied Energy*, 97: 419-429.
36. Sala J., Urresti A., Martín K., Flores I., Apaolaza A., 2008, Static and dynamic thermal characterisation of a hollow brick wall: Test and numerical analysis, *Energy and building*, 40: 1513-1520.
37. Saleh A., Al-Ajlan, 2006, Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique, *Applied Thermal Engineering*, 26: 2184-2191.
38. Sami A., Al-Sanea M.F., Zedan S.N., Al-Hussain, 2013, Effect of masonry material and surface absorptivity on critical thermal mass in insulated building walls, *Applied Energy*, 102:1063–1070.
39. Thermofocal™, Visitado en Enero 20, 2015. URL: <http://www.thermocal.es/es>
40. Ulgen K., 2002, Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor, *Energy and building*, 34: 273-278.
41. Valencia L., 2005, *Estudio Numérico y Experimental de Flujo Rayleigh-Bénard en Cavidades Cúbicas para Régimen Transitorio y Turbulento*. Doctorado en Ingeniería Química, Universidad Rovira i Virgili, Tarragona, España.

Apéndice A

Calibración de sensores

Apéndice A. Calibración de sensores.

En este apéndice se muestra el procedimiento de calibración y la estimación de la incertidumbre de medición para cada uno de los sensores utilizados. Los sensores utilizados fueron para la medición del diferencial de temperatura al exterior e interior de la cavidad, el diferencial de temperatura entre dos superficies y la temperatura de referencia.

Temperatura diferencial

Los sensores de temperatura diferencial utilizados durante en el experimento, fueron seis termopilas de cuatro puntas cada una, formadas por termopares tipo T (Cobre-Constantán) con incertidumbre de $\pm 0.05^\circ\text{C}$. El método de calibración para las termopilas fue por comparación, usando dos baños térmicos PolyScience®.

Las puntas de las termopilas se introducen en tubos de ensayo y se colocan dentro del baño. La temperatura de un baño térmico se ajustó a un nivel de referencia (T_R) de 25°C mientras que en el otro baño térmico se varió la temperatura en un intervalo de $25\sim 40^\circ\text{C}$ con un incremento de 5°C . El intervalo de temperatura de prueba es de un $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ que corresponde a el intervalo de operación de la termopila. En la **Figura A1** se muestran las termopilas introducidas en sus tubos de ensayo colocadas dentro de cada baño térmico.



Figura A1. Calibración de las termopilas.

En la **Tabla A1** se muestra la relación entre la variación de la *FEM* producida por la termopila diferencial y el diferencial de temperatura entre los dos baños térmicos.

Tabla A1 Diferencial de temperatura de los dos baños y la *FEM*.

T_R	ΔT	FEM
25	0	0
25	5	0.00070
25	10	0.00154
25	15	0.00237

En la **Figura A2** se muestra de manera representativa la relación entre el diferencial de temperatura de los dos baños y la *FEM* producida por la termopila. Con los valores obtenidos fue posible obtener la **Ecuación A.1** corregida para la temperatura diferencial.

$$\Delta T = 6270.1 x + 0.2663$$

A.1

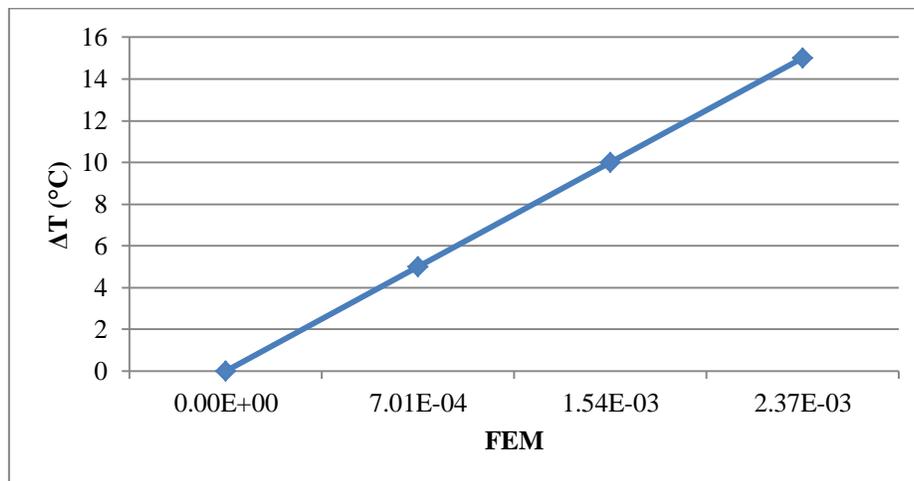


Figura A2. Temperatura diferencial de los baños vs la *FEM*.

Apéndice B

Cálculo de los coeficientes de
transferencia de calor

Apéndice B. Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor.

En este apéndice se muestra el procedimiento para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor involucrados al interior y al exterior de la cavidad, tomando únicamente el periodo para identificar los parámetros como se mencionó en la **Sección 3.2**.

Una vez conocidas todas las temperaturas involucradas sobre la cavidad $T_e(t)$, $T_{pe}(t)$, $T_{pm}(t)$, $T_{pi}(t)$ y $T_i(t)$, se determina el flujo de calor al interior Q_i y al exterior Q_e a partir de la ley Fourier considerando estado cuasi-estacionario como se muestra en la **Ecuación B.1 y B.2** respectivamente.

$$Q_i = \frac{\lambda(T_{pe} - T_{pm})}{\delta} \quad (\text{B.1})$$

$$Q_e = \frac{\lambda(T_{pm} - T_{pi})}{\delta} \quad (\text{B.2})$$

Con los flujos de calor determinados, se calculan los coeficientes de transferencia de calor al exterior y al interior de la cavidad a partir de la Ley de enfriamiento de Newton como se muestra en la **Ecuación B.3 y B.4** respectivamente.

$$h_i = \frac{Q_i}{(T_{pi} - T_i)} \quad (\text{B.3})$$

$$h_e = \frac{Q_e}{(T_e - T_{pe})} \quad (\text{B.4})$$

En la **Tabla A.1 y A.2** se presentan los valores de los coeficientes de transferencia de calor calculados mediante el ajuste presentado en la **Sección 3.2**, considerando las pruebas con la cavidad vacía al interior y con adiciónamiento de masa.

Tabla A.1 Valores de los coeficientes de transferencia de calor.

Prueba (Sin masa)	h_e (W/m ² °C)	h_i (W/m ² °C)
1	14.5	9.4
2	11.77	6
3	15	8
4	14	9
5	15	7
6	13.3	8
7	13.3	10

Tabla A.2 Valores de los coeficientes de transferencia de calor.

Prueba (Con masa al interior)	h_e (W/m ² °C)	h_i (W/m ² °C)
1	14.5	9.5
2	13.4	9.5
3	13	9
4	13.7	8