

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS EN
LAS ENVOLVENTES EMPLEADAS EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL**

GIOVANNY ANTONIO FUENTES RODRÍGUEZ

ANDRÉS ROBERTO ARNEADO CÁRDENAS

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS**

2013

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS EN
LAS ENVOLVENTES EMPLEADAS EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL**

**GIOVANNY ANTONIO FUENTES RODRÍGUEZ
ANDRÉS ROBERTO ARNEÑO CÁRDENAS**

Tesis de Grado presentada para optar al título de Ingeniero Mecánico

**ME, M.SC. JUAN GABRIEL FAJARDO CUADRO
Director**

**ME, M.SC. (C) CARLOS MANUEL RODRÍGUEZ JARABA
Co-Director**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS**

2013

Cartagena de Indias D.T.H. y C. 28 de Junio del 2013

Señores

COMITÉ CURRICULAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

Facultad de Ingenierías

Cartagena de Indias

Estimados Señores

Presentamos para su consideración el trabajo de grado **“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS EN LAS ENVOLVENTES EMPLEADAS EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL”** como requisito para optar por el título de ingenieros mecánicos.

Cordialmente,

Andrés Roberto Arnedo Cárdenas
C.C. 1.047.428.035 de Cartagena

Giovanny Antonio Fuentes Rodríguez
C.C.1.047.432.700 de Cartagena

Cartagena de Indias D.T. H. y C. 28 de Junio del 2013

Señores

COMITÉ CURRICULAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

Facultad de Ingenierías

Cartagena de Indias

Estimados Señores

Luego de revisar el trabajo de grado **“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS EN LAS ENVOLVENTES EMPLEADAS EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL”** de los estudiantes, Giovanni Antonio Fuentes Rodríguez y Andrés Roberto Arnedo Cárdenas; considero que cumple con los objetivos propuestos, por lo que estoy de acuerdo en presentarlo formalmente para su calificación y así optar por el título de Ingenieros Mecánicos.

Cordialmente,

Juan Gabriel Fajardo Cuadrado

Director de Proyecto

Cartagena de Indias D.T. H. y C. 28 de Junio del 2013

AUTORIZACIÓN

Yo, Giovanni Antonio Fuentes Rodríguez, identificado con cedula de ciudadanía 1.047.432.700 de Cartagena. Autorizo a la UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR, para hacer uso de este trabajo de grado y publicarlo en el catálogo on-line de su biblioteca.

Cordialmente,

Giovanni Antonio Fuentes Rodríguez
C.C.1.047.432.700 de Cartagena

Cartagena de Indias D.T. H. y C. 28 de Junio del 2013

AUTORIZACIÓN

Yo, Andrés Roberto Arnedo Cárdenas, identificado con cedula de ciudadanía 1.047.428.035 de Cartagena. Autorizo a la UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR, para hacer uso de este trabajo de grado y publicarlo en el catálogo on-line de su biblioteca.

Cordialmente,

Andrés Roberto Arnedo Cárdenas
C.C. 1.047.428.035 de Cartagena

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena de Indias D.T. H. y C. 28 de Junio del 2013

Dedicatoria

Dedico mi carrera como profesional y mi trabajo de grado a DIOS y mi familia, mi Padre Giovanni y mi Madre Patricia que siempre estuvieron presente y me brindaron apoyo, confianza y consejos para formarme como una excelente persona y un gran profesional, a mis hermanos, abuelos, tíos y primos por su comprensión y disposición a brindarme la ayuda para terminar este trabajo. También a mi tutor de tesis Ing. Carlos Rodríguez Jaraba, y mi director de la misma, Ing. Juan Fajardo Cuadrado.

Giovanny Antonio Fuentes Rodríguez

Dedico este trabajo de grado por sobre todo a Dios y a mi familia, que me han acompañado durante todo mi vida, de igual forma a mis amigos, compañeros y nuestros directores de tesis, ya que de cierta forma todos contribuyeron a alcanzar este logro.

Andrés Roberto Arnedo Cárdenas

Agradecimientos

Los Autores expresamos nuestros Agradecimientos a:

- ✚ Le agradecemos a DIOS por brindarnos las fuerzas y apoyo en aquellos momentos en los que pensamos que no terminaría este trabajo.
- ✚ Nuestras familias por todo el apoyo y confianza que nos brindaron.
- ✚ Especial agradecimiento al M.E. Carlos Rodríguez Jaraba por su asesoría, ayuda, consejos y conocimiento impartido para la realización de este trabajo de grado.
- ✚ M.E. M.S.c. Juan Fajardo Cuadro por todo el apoyo y asesoría brindada.
- ✚ A nuestros amigos y de estudios que siempre estuvieron ahí apoyándome.
- ✚ A toda el plantel docente del programa de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, por el conocimiento, formación y consejos que me brindaron en estos cinco años, especial agradecimiento a los profesores, Edgardo Arrieta, Luis Majana Coneo, Vladimir Quiroz, Miguel Romero, Jairo Useche y Alfredo Abuchar, entre otros que nos brindaron conocimiento y experiencia de vida.
- ✚ Especial Agradecimiento a la Universidad Tecnológico de Bolívar, gracias a esta pudimos realizar nuestros estudios de educación superior en una de las mejores universidades de la costa y de la nación.

RESUMEN

En el siguiente documento se describe el trabajo realizado en la investigación la cual consiste en realizar pruebas a envoltentes navales a través de la caja caliente de la Universidad Tecnológica de Bolívar construida en base a la norma ASTM C1363, los envoltentes a evaluar están contruidos con tres materiales aislantes distintos: poliuretano, lana de roca y fibra de vidrio y estos a su vez en 3 espesores de 25 mm, 50 mm y 75 mm,; las muestras son sometidas a ambientes en condiciones térmicas iguales a las que son utilizadas realmente, para esto la caja caliente cuenta con dos cajas una fría y otra caliente equipada con la instrumentación necesaria que consta de sensores de temperatura, velocidad del aire y flujo de calor, más un sistema de adquisición de datos y un software de monitoreo y registro de los datos obtenidos. Antes de realizar las pruebas a las muestras fue necesario realizar pruebas a materiales térmicamente conocidos, para nuestro caso se escogió el poliestireno expandido (ESP), con el fin de garantizar que el funcionamiento y la calibración de la caja caliente sea la correcta tal como lo indica la norma, una vez la instalación estuvo calibrada se procedió a realizar las pruebas y cuando obtuvimos los datos finalmente realizamos el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor "U"; con los valores ya calculados era necesario validar estos con otro método, estos fueron comparados con el método teórico propuesto por la ASHRAE (Sociedad Americana de Aire Acondicionado, Refrigeración y Calefacción) el Método de la Zona y con los ya establecidos por parte de la SNAME (Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos), por último se realizó un análisis y conclusión de todos los resultados y en base a las posibles fallas de la caja caliente se plantearon posibles cambios en la instalación para mejorar su rendimiento.

ABSTRACT

The following document describes the work done in the investigation which involves testing enclosures naval through the hot box of the Universidad Tecnológica de Bolívar built based on the ASTM C1363 standard, to evaluate enclosures are constructed in three different insulating materials polyurethane, rock wool and glass fiber and these in turn in 3 thicknesses of 25 mm, 50 mm and 75 mm, samples are subjected to environments in equal thermal conditions to which they are actually used for this hot box features two boxes a cold and other hot equipped with the necessary instrumentation consisting of temperature sensors air velocity and heat flux, plus a system of data acquisition and software for monitoring and recording data before testing the samples was necessary testing thermally known materials in this case expanded polystyrene (ESP) was chosen, in order to ensure that the performance and calibration of the hot box is correct as indicated in the standard, once the system was calibrated proceeded to perform the tests and when we got the data finally we carry out the calculation of the overall heat transfer coefficient 'U'; with the already calculated values it was necessary to validate these with another method, these were compared with the method theory proposed by the ASHRAE (American Society of heating and air conditioning, refrigeration) method of the area and with those already established by the SNAME (society of naval architects and marine engineers), finally an analysis and conclusion based on the possible failure of the hot box and all results were possible changes in the system to improve its performance.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVO GENERAL	20
OBJETIVOS ESPECIFICOS	21
“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS EN LAS ENVOLVENTES EMPLEADAS EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL”	22
<u>CAPÍTULO 1</u>	22
1. ESTADO DEL ARTE	22
1.1. TRANSFERENCIA DE CALOR	22
1.1.1. Mecanismo de transferencia de calor.....	22
1.1.1.1. Conducción	22
1.1.1.2. Convección	24
1.1.1.3. Radiación	25
1.2. MODOS COMBINADOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	28
1.2.1. Coeficiente global de transferencia de calor U	30
1.2.2. Resistencia térmica	32
1.3. METODOS DE CÁLCULO DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE DISEÑO	34
1.3.1. Cálculo de los coeficientes globales de transferencia de calor	35
1.3.1.1. Resistencia Térmica pelicular	37
1.3.1.2. Trayectoria del flujo de calor en serie y paralelo	38
1.4. FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DE PANELES QUE CONTIENEN METAL	40
1.4.1. Método de la SNAME	40
a) Superficie hacia el Aire Interior.....	42
b) Aire Exterior hacia el Aire interior	43
c) Aire Interior hacia Agua de mar	43
d) Aire Interior hacia Aire Interior.....	43

1.4.2. Método de la zona.....	43
1.4.3. Flujo de calor en serie a través de áreas desiguales	48
1.4.4. Concepto de U_0	49
1.5. METODOS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR PROPIEDADES TERMICAS.....	50
1.5.1. Método de la placa caliente	50
1.5.2. Método de la caja caliente	52
1.5.2.1. Caja caliente con guarda	53
1.5.2.2. Caja caliente calibrada	54
1.5.2.3. Funcionamiento de la Caja Caliente.....	54
1.5.2.4. Diferencias entre la caja caliente con guarda y la caja caliente calibrada	56
1.6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	57
1.6.1. Investigación previa evaluaciones experimentales en cajas calientes.....	57
1.6.1.1. Caja caliente TNO “Calibration of the TNO guarded hot box as specified in ISO 12567-1:2000”	57
1.6.1.2. Caja caliente con guarda Branz (Nueva Zelanda) “Thermal resistance of a block wall”	59
1.6.1.3. Caja caliente de TUD (Dinamarca) “Validating Numerical Calculations Against Guarded Hot Box Measurements”	61
1.6.1.4. Caja caliente con guarda rotable de NPL (Inglaterra) “Validation of the NPL rotatable wall guarded hot box with horizontal heat flow”.....	63
1.6.1.5. “Caja caliente rotable con guarda (Ornl, Usa)”	65
1.6.1.6. “Cámara ambiental (Bcee, Canadá)”	68
1.6.1.7. Una caja caliente calibrada para la prueba de sistemas de ventana, construcción, calibración y mediciones en prototipo de ventanas de alto rendimiento. “A calibrated hotbox for Testing Window system- construction, calibration and measurements on prototype high-performance windows”	72
1.6.1.8. Caja caliente de la Universidad de Perugia (Italia)“Mediciones de transmitancia térmica con el método de la caja caliente: Calibración, procedimientos experimentales y análisis de incertidumbre de tres enfoques diferentes”	74
1.6.2. Cuadros comparativos de cajas calientes	78
<u>CAPÍTULO 2</u>.....	83
2.1. ASPECTOS GENERALES DE LA NORMA ASTM C1363.....	83
2.1.1. ALCANCE	83
2.1.2. FUNCIONAMIENTO	83
2.1.3. CONDICIONES PARA LAS PRUEBAS	84
2.1.4. PROCEDIMIENTO RECOMENDADO.....	86
2.1.4.1. Aspectos Importantes.....	87

<u>CAPÍTULO 3</u>	88
3. DESCRIPCION DEL EQUIPO UTILIZADO	88
3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CAJA CALIENTE UTB	88
3.2. LADO CALIENTE	89
3.2.1. Panel o Carcasa del lado caliente.....	89
3.2.2. Ductos de Aire caliente	90
3.2.3. Resistencia eléctrica.....	91
3.2.4. Marco de la Resistencia	91
3.2.5. Ventilador	92
3.2.6. Accesorios	92
3.3. LADO FRÍO	93
3.3.1. Carcasa del lado frío	94
3.3.2. Ductos lado frío	94
3.4. PANEL CENTRAL O DE MUESTRAS	96
3.5. BASE MÓVIL	97
3.6. SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN	98
3.6.1. Sensores	102
3.6.1.1. Sensores de temperatura.....	102
3.6.1.2. Sensores de flujo de aire	103
3.6.1.3. Sensores de Flujo de calor.....	104
3.6.2. Hardware de adquisición de datos	105
3.6.2.1. NI cFP-1808 Interfaz Ethernet/Serial para NI Compact FieldPoint	106
3.6.2.2. NI cFP-TC-120. Módulo de Entrada de Termopares de 8 Canales para Compact FieldPoint.....	106
3.6.2.3. NI cFP-AI-111. Módulo de Entrada de Corriente Analógica de 16 Canales para Compact FieldPoint	107
3.6.3. Software de análisis y visualización	107
3.6.4. Sistema de Control de temperatura y velocidad.....	108
<u>CAPÍTULO 4</u>	112
4. RESULTADOS	112
4.1 EVALUACION EXPERIMENTAL	112
4.1.1. Procedimiento realizado	112
4.1.1.1 Análisis de incertidumbre	114
4.1.1.2. Calibración de la Caja caliente con Poliestireno Expandido	118

4.1.1.3. Resultado de pruebas a envoltentes de Poliuretano	123
4.1.1.4. Resultado de pruebas a envoltentes de Lana de Roca	125
4.1.1.5. Resultado de pruebas a envoltentes de Fibra de vidrio	126
4.2. RESULTADOS MÉTODO DE LA ZONA	128
4.2.1 Descripción del procedimiento	128
4.2.2. Calculo para las muestras	132
4.2.2.1. Poliuretano	132
4.2.2.2. Lana de Roca	134
4.2.2.3. Fibra de Vidrio.....	135
<u>CAPÍTULO 5</u>.....	138
5. ANALISIS DE RESULTADOS	138
5.1. ANALISIS DE RESULTADOS METODO DE LA CAJA CALIENTE	138
5.2. RESULTADOS OBTENIDOS VS REPORTE SNAME.....	139
5.2 RESULTADOS OBTENIDOS vs METODO DE ZONA.....	142
CONCLUSIONES.....	147
RECOMENDACIONES.....	148
• Recubrimiento al cableado de sensores	149
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	150
ANEXOS	152
ANEXO A. Tablas reporte SNAME.....	152
Anexo A1. Valores de “U” para espesores de 0 pulgadas de aislamiento	152
Anexo A2. Valores de “U” para espesores de 1 pulgadas de aislamiento.	153
Anexo A3. Valores de “U” para espesores de 2 pulgadas de aislamiento.	154
Anexo A4. Valores de “U” para espesores de 3 pulgadas de aislamiento.	155

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. 1. Conducción de calor a través de una pared plana de espesor Δx y área A.....	24
Figura 1. 2. Circuito térmico, Modos combinados de transferencia de calor	29
Figura 1. 3. Circuito térmico, Tubería de agua fría asilada.....	32
Figura 1. 4. Cubierta de Techo.....	45
Figura 1. 5. Esquema representativo de un equipo de placa caliente.....	51
Figura 1. 6. Esquema de una Caja caliente con Caja de Guarda.....	53
Figura 1. 7. Esquema Caja Caliente Calibrada	54
Figura 1. 8. Esquema de funcionamiento de la caja caliente con guarda.....	55
Figura 1. 9. Distribución de sensores caja caliente TNO.....	58
Figura 1. 10. Caja caliente BRANZ.....	60
Figura 1. 11. Esquema de caja caliente BRANZ	60
Figura 1. 12. Sección transversal de la caja caliente vigilado.....	62
Figura 1. 13. Diagrama esquemático del aparato y los sistemas de control asociados	64
Figura 1. 14. Fotografía caja caliente rotable con guarda NPL	64
Figura 1. 15. Componentes de la Caja Caliente Rotable con Guarda (ORNL)	67
Figura 1. 16. Caja Caliente Rotable con Guarda (ORNL)	68
Figura 1. 17. Componentes de la Cámara Ambiental (BCEE)	69
Figura 1. 18. Modo Muestra en el Marco con Cámara de Medición (BCEE)	71
Figura 1. 19. Cámara Climática (BCEE)	72
Figura 1. 20. Vistas de la caja caliente.....	73
Figura 1. 21. (a, b, c). Panel central de muestras, diferentes configuraciones.....	75
Figura 1. 22. Despiece y configuración de la caja caliente Perugia.....	76
Figura 1. 23. Sistema de calefacción lado caliente	77
Figura 1. 24. Vista general del aparato de caja caliente.....	77
Figura 3. 1. Carcasa Lado caliente	90
Figura 3. 2. Vista Interior Carcasa lado caliente	90
Figura 3. 3. Ducto de aire.....	91
Figura 3. 4. Ducto de aire con bordes visibles	91
Figura 3. 5. Ducto de aire 90°	91
Figura 3. 6. Resistencia tubular plana	91
Figura 3. 7. Ventilador	92
Figura 3. 8. Plano del ventilador	92
Figura 3. 9. Isométrico del sistema de transferencia de calor por convección.....	93
Figura 3. 10. Isométrico 90° del sistema de transferencia de calor por convección.....	93
Figura 3. 11. Lateral del sistema de transferencia de calor por convección	93
Figura 3. 12. Superior del sistema de transferencia de calor por convección.....	93
Figura 3. 13. Carcasa lado frío	94
Figura 3. 14. Carcasa lado frío	94
Figura 3. 15. Carcasa lado frío	95
Figura 3. 16. Carcasa lado frío bordes ocultos.....	95
Figura 3. 17. Carcasa lado frío Vista 90°	95

Figura 3. 18. Conductos de aire	95
Figura 3. 19. Conductos de aire bordes ocultos	95
Figura 3. 20. Conductos de aire vista 90°	95
Figura 3. 21. Isométrico lado frío	95
Figura 3. 22. Isométrico lado frío con bordes ocultos	95
Figura 3. 23. Isométrico lado frío vista trasera.	95
Figura 3. 24. Configuración lado frío	95
Figura 3. 25. Configuración lado frío bordes cultos	95
Figura 3. 26. Configuración lado frío vista 90°	95
Figura 3. 27. Panel de muestras de 110 mm	96
Figura 3. 28. Panel de muestras de 110 mm bordes ocultos	96
Figura 3. 29. Base móvil	97
Figura 3. 30. Caja caliente de la UTB	97
Figura 3. 31. Caja caliente de la UTB, Vista interior.....	98
Figura 3. 32. Distribución de los sensores de velocidad y temperatura.....	99
Figura 3. 33. Muestra de prueba con bulbo HP 80 x 6 y ubicación se sensores de flujo de calor.....	99
Figura 3. 34. Muestra de prueba con bulbo HP 80 x 6 y ubicación se sensores de flujo de calor y temperatura superficial.....	100
Figura 3. 35. Fotografía Muestra ubicada en el panel central con grilla de ubicación lado caliente	100
Figura 3. 36. Fotografía 3.2. Muestra ubicada en el panel central del lado frío	100
Figura 3. 37. Fotografía Identificación de la posición de sensores de flujo de calor y temperatura superficial sobre la muestra del Lado caliente	101
Figura 3. 38. Fotografía Instrumentación de una muestra Lado caliente.....	101
Figura 3. 39. Fotografía Instrumentación de una muestra Lado frío	101
Figura 3. 40. Esquema de la termocuplas de rápida respuesta SA1	102
Figura 3. 41. Termocuplas de rápida respuesta SA1	103
Figura 3. 42. Esquema del sensor LG 518 GA	103
Figura 3. 43. Sensor LG 518 GA	103
Figura 3. 44. Esquema del sensor HFS-3	104
Figura 3. 45. Sensor de flujo de calor de película delgada HFS-3.....	105
Figura 3. 46. NI cFP-1808 Interfaz Ethernet/Serial para NI Compact FieldPoint.....	106
Figura 3. 47. NI cFP-TC-120. Módulo de Entrada de Termopares de 8 Canales para Compact FieldPoint.....	106
Figura 3. 48. NI cFP-AI-111. Módulo de Entrada de Corriente Analógica de 16 Canales para Compact FieldPoint.....	107
Figura 3. 49. Interface de Usuario y ventana de Programación	108
Figura 3. 50. Interfaz de Labview para la caja caliente	108
Figura 3. 51. Fotografía acople de las dos cajas (caliente y fría) durante una prueba. El marco donde se ubica la muestra es la parte central de color negro	110
Figura 3. 52. Fotografías Panel de control de la caja caliente.....	110
Figura 3. 53. Esquema del sistema de control.....	111
Figura 4. 1. Fotografía del cuadro de monitoreo de los sensores temperaturas y calor de la caja caliente a través de NI LabView 8.6 en una corrida de toma de datos	119
Figura 4. 2. Ilustración de organización de datos en matriz de Excel almacenada por el software NI Labview 8.6 y sistema de adquisición de datos	120

Figura 4. 3. Comportamiento de temperaturas muestra de poliestireno	120
Figura 4. 4. Comportamiento del flujo de calor de poliestireno	120
Figura 4. 5. Distribución de materiales probetas de 75 mm de aislante.....	121
Figura 4. 6. Distribución de materiales probetas de 50 mm de aislante.....	122
Figura 4. 7. Distribución de materiales probetas de 25 mm de aislante.....	122
Figura 4. 8. Comportamiento de temperaturas superficiales muestra de poliuretano 25 mm	124
Figura 4. 9. Comportamiento del flujo de calor muestra de poliuretano 25 mm	124
Figura 4. 10. Comportamiento de temperaturas superficiales muestra de Lana de roca 25 mm	125
Figura 4. 11. Comportamiento del flujo de calor muestra de Lana de roca 25 mm.....	125
Figura 4. 12. Comportamiento de temperaturas superficiales muestra de Fibra de Vidrio 25 mm	126
Figura 4. 13. Comportamiento del flujo de calor muestra de Fibra de Vidrio 25 mm.....	127
Figura 4. 14. Esquema superior de las muestras	130
Figura 4. 15. Vistas frontal representativas de las muestras	130
Figura 4. 16. Distribución de materiales, áreas y dimensiones de la Zona A	131
Figura 5. 1. Gráfica y ecuación del comportamiento muestras de poliuretano “U” vs espesor.....	143
Figura 5. 2. Gráfica y ecuación del comportamiento muestras de Lana de Roca “U” vs espesor.....	143
Figura 5. 3. Gráfica y ecuación del comportamiento muestras de Fibra de Vidrio “U” vs espesor.....	144
Figura 5. 4. Ilustración de áreas de menor conductividad, no tenidos en cuenta para el cálculo de la conductancia de la zona A	146

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. 1. Variación del flujo de calor con la temperatura.....	38
Tabla 1. 2. Valores máximos de “U” según el rango de temperaturas.....	41
Tabla 1. 3. Cuadro comparativo de cajas calientes	79
Tabla 3. 1. Rangos de operación de la caja	102
Tabla 3. 2. Especificaciones técnicas termocuplas de rápida SA1	102
Tabla 3. 3. Especificaciones técnicas Sensor LG 518 GA.....	104
Tabla 3. 4. Especificaciones técnicas sensor HFS-3	104
Tabla 4. 1. Primer paso para análisis incertidumbre	115
Tabla 4. 2. Segundo pasó para análisis de incertidumbre de una medición.....	116
Tabla 4. 3. Tercer paso para análisis de incertidumbre.....	116
Tabla 4. 4. Cuarto pasó para análisis de incertidumbre	117
Tabla 4. 5. Elementos de incertidumbre.....	117
Tabla 4. 6. Resultados del cálculo de la conductividad térmica Poliestireno.	120
Tabla 4. 7. Figuras y medidas de los tipos de muestras	122
Tabla 4. 8. Resultado final de los cálculos para las muestras de poliuretano	124
Tabla 4. 9. Resultado final de los cálculos para las muestras de Lana de roca.....	126
Tabla 4. 10. Resultado final de los cálculos para las muestras de Fibra de Vidrio.....	127
Tabla 4. 11. Resultado final de todos los materiales del método de la caja caliente	128
Tabla 4. 12. Configuraciones de las muestras a evaluar	129
Tabla 4. 13. Calculo de las resistencias de los materiales de la zona A para muestra de poliuretano de 25 mm según el método de la zona	132
Tabla 4. 14. Calculo de las resistencias de los materiales de la zona B para muestra de poliuretano de 25 mm según el método de la zona	133
Tabla 4. 15. Calculo de las resistencias de los materiales de la zona A para muestra de lana de roca de 25 mm según el método de la zona	134
Tabla 4. 16. Calculo de las resistencias de los materiales de la zona B para muestra de lana de roca de 25 mm según el método de la zona	134
Tabla 4. 17. Calculo de las resistencias de los materiales de la zona A para muestra de lana de roca de 25 mm según el método de la zona	135
Tabla 4. 18. Calculo de las resistencias de los materiales de la zona B para muestra de fibra de vidrio de 25 mm según el método de la zona	136
Tabla 4. 19. Resultados Finales Obtenidos con el método de la zona	137
Tabla 5. 1. Coeficientes “U” en unidades Internacionales e Inglesas.....	138
Tabla 1. 2. Valores máximos de “U” según el rango de temperaturas.....	139
Tabla 5. 3. Diferencias entre resultados y metodología SNAME.....	141
Tabla 5. 4. Tabla comparativa de resultados finales de ambos métodos	142
Tabla 5. 5. Tabla comparativa de resultados finales de ambos métodos	145

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las fuentes de energía en el planeta se están agotando, esto ha despertado la necesidad de crear nuevas fuentes y el ahorro máximo de esta; en cualquier tipo de construcción si hacemos un análisis es notorio que gran parte del consumo de energía es a causa de la refrigeración, de igual forma ocurre en la industria naval, entonces de ahí parte la necesidad de idear maneras de cómo reducir este consumo al máximo, evidentemente en un sistema de refrigeración los aislamientos térmicos cumple una función muy importante ya que gracias a estos podemos reducir la cantidad de energía que se suministre a un espacio para mantener una temperatura de confort, que es tan fundamental para el desarrollo de las actividades realizadas en las embarcaciones.

Para los análisis de este tipo de envolventes utilizados para aislar el calor es necesario utilizar un dispositivo que permita caracterizarlos y determinar sus propiedades para la selección correcta del material con mayor funcionabilidad en las embarcaciones, el equipo idóneo para realizar esto es conocido como “HOT BOX” o caja caliente, el cual tiene la capacidad de determinar la transmitancia o coeficiente global de transferencia de calor “U” de materiales homogéneos y no homogéneos como es el caso de los envolventes, ya que gracias a su configuración no hay un método teórico exacto que permita caracterizarlos.

En el presente proyecto investigaremos el coeficiente global de transferencia de calor de envolventes que pertenecen a Buques Tipo Nodriza Fluvial (OEB), caracterizando estos materiales ya que la última información válida registrada acerca de estos es brindada por la SNAME hace años atrás, lo cual hace de mayor importancia nuestra investigación.

OBJETIVO GENERAL

Determinar las propiedades térmicas de envolventes empleadas en la construcción naval en Colombia mediante la evaluación experimental de muestras con diferentes materiales aislantes en una instalación tipo “Caja Caliente” con el propósito de obtener factores que permitan mejorar los resultados obtenidos en los cálculos de sistemas de acondicionamiento de aire para buques.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar experimentalmente el grupo de muestras construidas con diferentes materiales y espesores de aislamiento para determinar sus propiedades térmicas y comparar los resultados con los valores disponibles en la literatura.
- Realizar el análisis de incertidumbre de la instalación experimental tipo “Caja Caliente” aplicando las metodologías que para ello existen con el propósito de determinar los límites dentro de los cuales se espera deba encontrarse los valores verdaderos de las propiedades térmicas evaluadas experimentalmente.
- Poner a punto la instalación experimental tipo “Caja caliente” mediante la verificación del funcionamiento del sistema de control, del sistema de adquisición de datos, del sistema de calefacción y enfriamiento empleado para simular las condiciones de temperatura y calor.
- Elaboración de artículo científico en base a los resultados.

“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS EN LAS ENVOLVENTES EMPLEADAS EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL”

CAPÍTULO 1

1. ESTADO DEL ARTE

En el presente capitulo se describirán los diferentes mecanismos de transferencia de calor y los posibles métodos de cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, como también las diferentes propiedades térmicas de materiales de construcción. Y describimos algunas cajas calientes existentes.

1.1. TRANSFERENCIA DE CALOR

1.1.1. Mecanismo de transferencia de calor

La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura. El calor se puede transferir en tres modos diferentes: *conducción*, *convección* y *radiación*.¹

1.1.1.1. Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultados de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos y

¹Cengel, Yunus A., Transferencia de calor y masa un enfoque práctico, tercera edición, México D.F., edición McGraw-Hill interamericana, año 2007, número de páginas 736, numero normalizado ISBN-13: 978-970-10-6173-2, Pagina 17.

gaseosos. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En el caso de los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas.²

La elevación de temperatura aumenta la excitación de las partículas más elementales de la materia, transmitiéndose dicha excitación a las más próximas de su entorno y con ello su energía calorífica, continuándose el proceso en el cuerpo en cuestión de la zona más caliente a la más fría. Cuanto más denso, compacto y pesado es un cuerpo, más próximas están las moléculas entre sí y, por tanto, el cambio se realiza con mayor facilidad.

La velocidad de la conducción de calor a través de un cuerpo o medio depende de la configuración geométrica de éste como, su espesor, tamaño y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él.

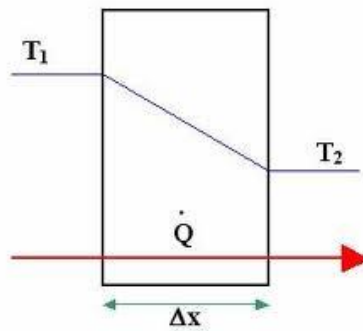
La conducción se expresa por la *ley de Fourier de la conducción del calor*:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

Donde k es la conductividad térmica del material (constante), A es el área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor y dT/dx es el gradiente de temperatura (El cual es la pendiente de la curva del diagrama temperatura vs ubicación).

La magnitud de la velocidad de conducción de calor a través de una capa plana de espesor L como se observa en la **figura 1.1**, se expresa por:

²IBIDEM, Pagina 18.



Fuente: Google Imágenes.

Figura 1. 1. Conducción de calor a través de una pared plana de espesor Δx y área A

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{L} = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L} \quad (1.2)$$

Donde ΔT es la diferencia de temperatura de uno a otro lado de la capa.

1.1.1.2. Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que se están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.

La convección recibe el nombre de *convección forzada* si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Y se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido.

La rapidez de transferencia de calor por convección se expresa por la *ley de enfriamiento de Newton* como:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty)(1.3)$$

En donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, A_s es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido suficientemente alejado de la superficie.

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad del mismo.³

1.1.1.3. Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en la forma de ondas electromagnéticas (fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. Mientras las dos formas de transmisión anteriores (conducción y convección) necesitan de un medio material para transferir calor; la transmisión por radiación puede realizarse en el vacío (Es la más rápida, puede ir a la velocidad de la luz).

En los estudios de transferencia de calor es de interés la *radiación térmica*, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura (Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica). La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados.

³OP-CIP, Pagina 26.

La velocidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura absoluta T_s se expresa por la *ley de Stefan – Boltzmann* como:

$$\dot{Q}_{emitida,máx} = \sigma A_s T_s^4 \quad (1.4)$$

Donde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4 = 0,1714 \times 10^{-8} Btu / h \cdot ft^2 \cdot R^4$ es la constante de Stefan – Boltzmann.

La superficie ideal que emite radiación a esta velocidad máxima se llama *cuerpo negro*.

La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como:

$$\dot{Q}_{emitida} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (1.5)$$

Donde ε es la *emisividad* de la superficie y su valor que está en el intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$, es una medida de cuán próxima está una superficie de ser un cuerpo negro, para el cual $\varepsilon = 1$.

Otra propiedad relativa a la radiación de una superficie es su *absortividad* α que es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta. Su valor también está en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$, donde $\alpha = 1$, para un cuerpo negro; lo cual nos dice que un cuerpo negro es un absorbente perfecto desde mismo modo que un emisor perfecto. La velocidad a la cual una superficie absorbe radiación se determina a partir de:

$$\dot{Q}_{absorbido} = \alpha \dot{Q}_{incidente} \quad (1.6)$$

En donde $\dot{Q}_{incidente}$ es la velocidad a la cual la radiación incide sobre la superficie y α la absortividad de la superficie.

La diferencia entre las velocidades de la radiación emitida por la superficie y la radiación absorbida es la transferencia neta de calor por radiación. Si la razón de absorción de la radiación es mayor que la emisividad, se dice que la superficie está ganando energía por radiación. De lo contrario, se dice que la superficie está ganando energía por radiación. En general, la determinación de la velocidad neta de la transferencia de calor por radiación entre dos superficies es complicada, ya que depende de las propiedades de las superficies, de la orientación de una con respecto a la otra y de la interacción del medio que existe entre ellas con la radiación.

Cuando una superficie o cuerpo de emisividad ε y área superficial A_1 que se encuentra a una temperatura absoluta T_1 está completamente encerrada por una superficie mayor (o negra) que se encuentra a una temperatura absoluta T_2 y separada por un gas (como el aire) que no interviene con la radiación, la rapidez neta de transferencia de calor por radiación entre las dos superficies se expresa por:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.7)$$

En este caso la emisividad y el área superficial de la superficie circundante no tienen efecto sobre la transferencia neta de calor por radiación.

Si ninguna de las dos superficies o cuerpos es un radiador ideal y si ambos guardan una relación geométrica entre sí, la transferencia de calor neta por radiación entre ellos es:

$$\dot{Q}_{rad} = q_{rad} = A_1 F_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.8)$$

Donde F_{1-2} es una magnitud adimensional que modifica la ecuación para los radiadores ideales de manera que tengan en cuenta las emisividades y las geometrías relativas de los cuerpos reales.⁴

⁴OP-CIT, Pagina 27-30.

1.2. MODOS COMBINADOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Se mencionó que existen tres tipos de mecanismos de transferencia de calor, pero no pueden existir simultáneamente los tres en un medio. Por ejemplo, la transferencia de calor solo ocurre por conducción en los sólidos opacos, pero por conducción y radiación en los sólidos semitransparentes. Por lo tanto un sólido puede comprender conducción y radiación pero no convección. Sin embargo, un sólido puede presentar transferencia de calor por convección y/o radiación en sus superficies expuestas a un fluido o a otras superficies.

La transferencia de calor por radiación hacia una superficie, o desde esta, está rodeada por un gas como el aire, ocurre paralela a la conducción (o convección, si se tienen un movimiento masivo del gas) entre esa superficie y el gas. Por tanto, la transferencia total de calor se determina al sumar las contribuciones de los dos mecanismos de transferencia. Por sencillez y conveniencia esto se lleva a cabo con frecuencia mediante la definición de un coeficiente combinado de transferencia de calor, $h_{combinado}$, que incluye los efectos tanto de la convección como de la radiación. Entonces, la razón total de la transferencia de calor hacia una superficie, o desde esta, por convección y radiación se expresa como:⁵

$$\dot{Q}_{TOTAL} = h_{combinado} A_s (T_s - T_\infty) \quad (1.9)$$

Dónde:

$$h_{combinado} = h_r + h_c$$

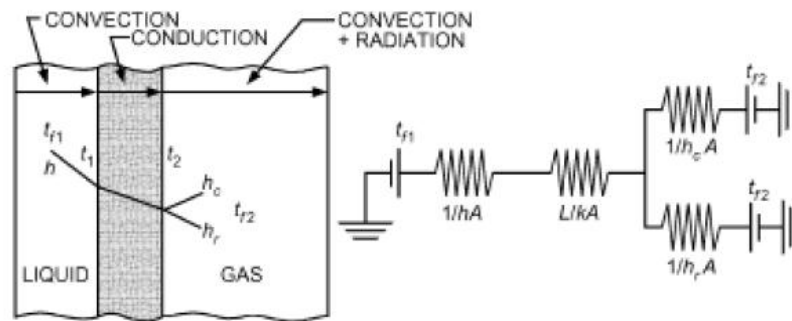
$h_r =$ *coeficiente de transferencia de calor por radiación*

$h_c =$ *coeficiente de transferencia de calor por convección*

En la anterior fórmula se observa que el coeficiente combinado de transferencia de calor es un coeficiente de calor por convección modificado incluyendo los efectos de la transferencia de calor por radiación.

⁵ASHRAE. Fundamentals Handbook Heat Transfer. 2005. Cap. 3.

Considere el flujo de calor de un líquido hacia el gas que lo rodea separados por una sección transversal constante de un área sólida, como se muestra en la **figura 1.2**. El flujo de calor desde el líquido hacia la superficie adjunta a él es por convección y posteriormente desde la superficie externa del sólido hacia sus alrededores es por convección y radiación.



Fuente: ASHRAE, Fundamentals, Cap. 3.

Figura 1. 2.Circuito térmico, Modos combinados de transferencia de calor

A partir del circuito térmico (**figura 1.2**) anterior se deduce la fórmula para evaluar el flujo de calor⁶:

$$\dot{Q} = \frac{(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{hA} + \frac{L}{kA} + \frac{(1/h_c A) + (1/h_r A)}{(1/h_c A) + (1/h_r A)}} \quad (1.10)$$

La transferencia de calor en un fluido estático (sin movimiento de masa del fluido) es por conducción y, posiblemente por radiación, y el caso de un fluido que fluye por conducción y radiación. En ausencia de la transferencia de calor por radiación, la transferencia sería por conducción o convección, dependiendo de la presencia de algún movimiento masivo de ese fluido. La convección se puede considerar como conducción y movimiento de los fluidos combinados, y la conducción se puede asumir como un caso especial de convección en ausencia del movimiento del fluido.

⁶ASHRAE. Fundamentals HandBook Heat Transfer. 2005. Cap. 3.

Por lo tanto cuando se trata con la transferencia de calor a través de un fluido, se tiene conducción o convección, pero nunca las dos. Por otra parte, los líquidos suelen ser fuertes absorbentes de radiación. Por último, la transferencia de calor a través del vacío solo se produce por radiación, ya que la conducción o la convección requiere de la presencia de un medio material.

Como se había mencionado anteriormente en la mayoría de los problemas de transferencia de calor se involucra más de un modo transferencia. Debido a esto nace la necesidad de combinar los distintos coeficientes de transmisión de calor, para que el flujo total de calor pueda ser calculado a partir de las temperaturas extremas. La solución de este problema se logra mediante los circuitos térmicos.

1.2.1. Coeficiente global de transferencia de calor U

En la mayoría de las aplicaciones industriales el calor es transferido de un fluido a otro en tres pasos en un proceso en estado estacionario: desde un fluido más caliente a una pared sólida, el paso a través de la pared sólida, y de aquí al fluido más frío. Cuando en un proceso existe más de un modo de transferencia se emplea comúnmente el coeficiente de transferencia de calor global U , basado en la diferencia total de temperatura entre los dos fluidos.⁷

El coeficiente global de transferencia de calor U basado en la diferencia de temperaturas de los dos fluidos se define como:

$$\dot{Q} = UA(t_2 - t_1) \quad (1.11)$$

Donde A es el área de transferencia de calor de la superficie.

Las caídas de temperatura a través de cada parte de la trayectoria del flujo de calor son:

⁷ Tesis de Grado. Diseño de una instalación para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor. 2009

$$\begin{aligned}
t_1 - t_{s1} &= qR_1 \\
t_{s1} - t_{s2} &= qR_2 \\
t_{s2} - t_2 &= qR_3
\end{aligned}$$

Donde t_{s1} y t_{s2} son las temperaturas superficiales caliente y fría de la pared respectivamente, y R_1 , R_2 y R_3 son las resistencias térmicas. Debido a que a través de cada resistencia térmica fluye la misma cantidad de calor, estas ecuaciones se pueden combinar obteniendo que:

$$(t_1 - t_2)/q = (1/UA) = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1.12)$$

Como se observa, las ecuaciones son análogas a un circuito eléctrico: para flujos térmicos que fluyen a través de diferentes resistencias en serie, los valores de resistencia se suman:

$$R_o = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (1.13)$$

De forma similar, la *conductancia* es el recíproco de la resistencia, y para un flujo de calor a través de resistencias en paralelo, las conductancias son aditivas:

$$C = (1/R_o) = (1/R_1) + (1/R_2) + (1/R_3) + \dots + (1/R_n) \quad (1.14)$$

Para la transferencia de calor por convección, la resistencia térmica es inversamente proporcional al coeficiente de convección, h_c , y a la respectiva área superficial:

$$R_c = (1/h_c A) \quad (1.15)$$

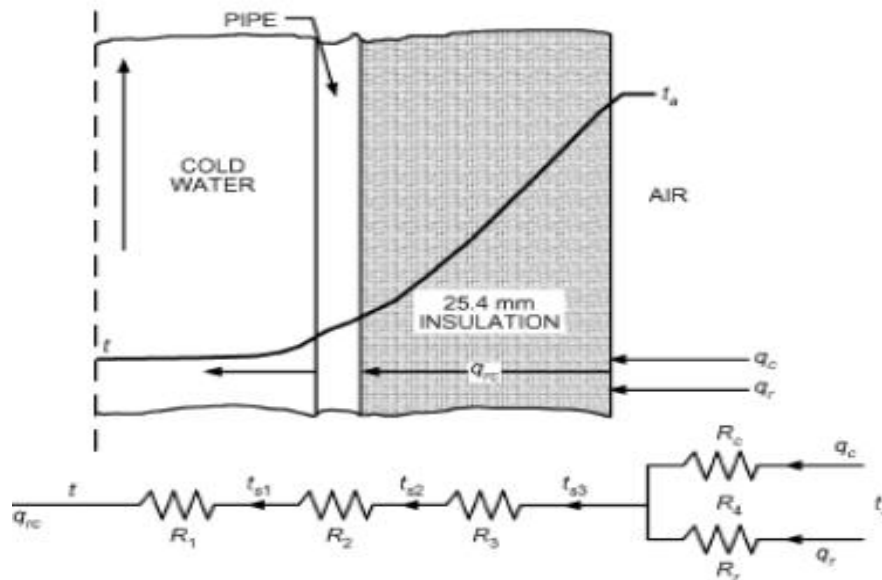
La resistencia térmica por radiación es similar a la de convección:

$$R_r = (1/h_r A) \quad (1.16)$$

Sin embargo la aplicación de estos coeficientes está limitada ya que el término “coeficiente de radiación”, h_r , no tiene significado físico, excepto en los cálculos. Es función de las temperaturas, de las propiedades de radiación, y del arreglo geométrico del recinto y del cuerpo en cuestión.⁸

1.2.2. Resistencia térmica

En el siguiente ejemplo **figura 1.3**. Se explicara el concepto de la resistencia térmica aplicado al caso de una tubería de agua fría aislada.



Fuente: ASHRAE, Fundamentals, Cap. 3.

Figura 1. 3. Circuito térmico, Tubería de agua fría aislada

Como el aire es sensiblemente transparente a la radiación, habrá transferencia de calor por radiación y convección hacia la superficie externa del aislamiento. El mecanismo actúa en paralelo en lado del aire. Entonces, la transferencia total a través de la capa aislante y de la pared del tubo se da por conducción térmica, de allí por convección y radiación hacia el flujo de agua fría. (La radiación no es significativa en el lado del agua debido a que los líquidos son sensiblemente opacos a la radiación, aunque el agua

⁸ASHRAE. Fundamentals HandBook Heat Transfer. 2005. Cap. 3.

transmite energía en la región visible.) Se asume despreciable la resistencia de contacto entre el aislamiento y la pared del tubo.

El calor transferido por longitud dada, L , del tubo, q_{rc} , puede ser considerado como un flujo a través de resistencias en paralelo, R_r y R_c , asociadas con los coeficientes superficiales de radiación y convección. El flujo procede entonces a través de la resistencia ofrecida a la conducción térmica por la resistencia del aislamiento R_3 , a través de la resistencia R_2 de la pared del tubo, y hacia el flujo de agua a través de la resistencia a la convección R_1 . Aquí se observa la analogía a una corriente eléctrica directa. Se requiere una caída de temperatura (potencial) para vencer las resistencias al flujo de corriente térmica. La resistencia total o global de transferencia de calor, R_o , es la suma de las resistencias individuales:

$$R_o = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (1.17)$$

Donde la *resistencia en paralelo* resultante, R_4 , se obtiene de:

$$\frac{1}{R_4} = \frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_c} \quad (1.18)$$

Si es posible evaluar las resistencias individuales, se puede obtener de esta relación la resistencia total. La transferencia de calor por longitud del tubo, L , puede establecerse entonces por:

$$q_{rc} = \frac{(t_o - t)}{R_o} \quad (1.19)$$

La velocidad de transferencia de calor por unidad de longitud de tubería es:

$$\frac{q_{rc}}{L} = \frac{(t_o - t)}{R_o L} \quad (1.20)$$

La caída temperatura, Δt , a través de cada resistencia individual puede ser calculada de la relación⁹:

$$\Delta t = Rq_{rc} \quad (1.21)$$

1.3. METODOS DE CÁLCULO DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE DISEÑO

El diseño de un sistema de calefacción, refrigeración y aire acondicionado, incluyendo la selección del aislamiento, el dimensionamiento de tuberías y ductos, o la evaluación del desempeño térmico de partes del sistema, se basa en los principios de la transferencia de Calor. Las ecuaciones que mayormente se usan para estimar la carga de transferencia de calor en las diferentes partes del sistema, generalmente determinan la velocidad de transferencia de calor bajo condiciones de estado estable. Para una parte dada bajo condiciones estándar, esa velocidad de transferencia es un valor específico, U, el *coeficiente global de transmisión de calor o transmitancia térmica*.

Estos coeficientes pueden ser determinados por ensayos o pruebas, o computados de los valores conocidos de conductancia térmica de los diferentes componentes. Debido a que es impráctico ensayar todas las combinaciones de materiales para determinar el coeficiente U, se dan tablas de valores de diseño para las construcciones más comunes.

Definiciones:

La *conductancia térmica*, C, se define como la transmisión térmica por unidad de tiempo por unidad de área de un cuerpo o estructura en particular con superficies definidas, cuando se establece entre las superficies límites una diferencia de temperatura promedio.

⁹ASHRAE. Fundamentals HandBook Heat Transfer. 2005. Cap. 3.

La *transmitancia térmica o coeficiente global de transferencia de calor*, U , se define como la transmisión de calor por unidad de tiempo por unidad de área de un cuerpo o estructura determinada, incluyendo las películas límites, dividida por la diferencia de temperatura entre el aire u otro fluido sobre cualquier lado de la estructura.

Si la estructura no es una simple placa, entonces resulta necesario fijar por donde se mide la superficie. La transmitancia difiere de la conductancia en que la diferencia de temperatura se mide entre puntos diferentes. Para la conductancia la diferencia de temperatura es la que existe entre los lados; para la transmitancia, es la que existe en el aire u otro fluido en la parte externa de los lados. De esta forma la transmitancia térmica U de una estructura implica tanto la conductancia térmica como los coeficientes superficiales de la estructura.¹⁰

1.3.1. Cálculo de los coeficientes globales de transferencia de calor

Usando los principios de la transferencia de calor, es posible calcular los coeficientes globales mediante el método de las resistencias. Como se mencionó antes, la resistencia total de una pared (o una superficie curva si la curvatura es pequeña), o de un piso, o techo plano, es numéricamente igual a la suma de las resistencias individuales en series.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (1.22)$$

Donde R_T es la resistencia total y R_1, R_2, R_3 , etc., son las resistencias individuales de los componentes de la pared.

Para una pared de un material simple homogéneo de conductividad k y espesor L con coeficientes superficiales h_i y h_o , se tiene que:

$$R_T = \frac{1}{h_i} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_o} \quad (1.23)$$

¹⁰ASHRAE. Fundamentals HandBook Heat Transfer. 2005. Cap. 3.

Entonces, por definición:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (1.24)$$

Para una pared de construcción con una cavidad de aire, que consiste de dos materiales homogéneos de conductividad k_1 y k_2 , y de espesor L_1 y L_2 , respectivamente, separados por un espacio de aire de conductancia C:

$$R_T = \frac{1}{h_i} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{1}{C} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{1}{h_o} \quad (1.25)$$

Y

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Se puede calcular la temperatura en cualquier interfase, debido a que el cambio de temperatura a través de cualquier componente de la pared es proporcional a su resistencia. Por consiguiente, el cambio de temperatura Δt_1 a través de R_1 en la ecuación (1.20) es:

$$\Delta t_1 = R_1(t_i - t_o)/R_T \quad (1.26)$$

Donde t_i y t_o son las temperaturas interior y exterior, respectivamente.

Por lo tanto, la temperatura en la interface entre R_1 y R_2 es:

$$t_{1-2} = t_i - \Delta t_1 \quad (1.27)$$

Para la clase de materiales de construcción que tienen secciones no uniformes o irregulares tales como un bloque hueco de arcilla o bloques de concreto, es necesario

usar la conductancia C de la sección tal y como ha sido fabricada. La resistencia R de la sección $1/C$ debe ser usada como una de las resistencias en una ecuación similar a la ecuación (1.23) y (1.25).

Para computar el valor de U de una construcción determinada, es necesario conocer primero la conductividad y el espesor de los materiales homogéneos, la conductancia de los materiales no homogéneos (como un bloque de concreto), la conductancia superficial de los dos lados de la construcción, y la conductancia de cualquier espacio de aire (cavidad) o la resistencia térmica de los elementos individuales.

Si las conductividades de los materiales en una pared dependen altamente de la temperatura, se debe conocer la temperatura media para asignar el valor correcto. En tales casos, quizás sea más conveniente usar un procedimiento de ensayo y error para el cálculo de la resistencia total R_T . Primero, se estima la temperatura media de operación para cada capa y se selecciona la conductividad k o la conductancia C . Entonces, se calcula la resistencia total R_T como en la ecuación (1.25) y la temperatura en cada interface a través de la ecuación (1.26) y (1.27).

La temperatura media de cada componente (la media aritmética de las temperaturas de superficie) puede usarse para obtener la conductividad k o la conductancia C . Este procedimiento se puede repetir hasta que se hayan seleccionado correctamente los valores de conductividad o conductancia para el resultado correspondiente de temperatura media. Generalmente, esto puede realizarse en dos o tres ensayos.¹¹

1.3.1.1. Resistencia Térmica pelicular

Las resistencias térmicas peliculares y su recíproco, el coeficiente de transferencia de calor, incluye la transferencia de calor de una superficie por los modos combinados de radiación, conducción y convección. Cada uno de estos modos de transferencia de calor,

¹¹ASHRAE. Fundamentals HandBook Heat Transfer. 2005. Cap. 3.

varía de forma independiente. La transferencia de calor por radiación entre dos superficies es controlada por las características de la superficie (emisividad y reflectancia), la diferencia de temperaturas entre las superficies y el ángulo de la superficie respecto a la otra. En la tabla 1.1 se muestra el efecto de la temperatura de la superficie en el flujo de calor por radiación. El calor transmitido por convección depende de la rugosidad de la superficie, el movimiento del aire y la diferencia de temperatura entre la superficie y el aire.

Tabla 1. 1. Variación del flujo de calor con la temperatura

Temperatura de la superficie circundante °C	Flujo de calor, W/m ²				
	23.9	21.1	18.3	15.6	10
Convección	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8
Radiación	13.9	27.1	40.4	53.6	78.6
Total	34.7	47.9	61.2	74.4	99.4

Fuente: ASHRAE, Fundamentals, Cap. 3.

La resistencia térmica total al flujo de calor a través de un cuerpo plano compuesto por capas paralelas rodeadas por diferentes ambientes está dada por.

$$R_T = R_i + R + R_o \quad (1.28)$$

Donde R_i es la resistencia térmica pelicular del interior del cuerpo y R_o es la resistencia térmica pelicular del exterior del cuerpo. Para una pared que incluye un espacio de aire con conductancia C, la resistencia global está dada por¹²:

$$R_T = R_i + R + \frac{1}{C} + R + R_o \quad (1.29)$$

1.3.1.2. Trayectoria del flujo de calor en serie y paralelo

¹²ASHRAE. Fundamentals HandBook Heat Transfer. 2005. Cap. 3.

En muchas instalaciones, el arreglo de los componentes es tal que resultan trayectorias del flujo de calor en paralelo de las diferentes conductancias. Si no hay flujo de calor lateral entre las trayectorias, puede considerarse que cada trayectoria se extiende desde el interior al exterior, y es posible calcular la transmitancia de cada recorrido usando la ecuación (1.24) o (1.26). La transmitancia promedio será entonces:

$$U_{(prom)} = a(U_a) + b(U_b) + \dots + n(U_n) \quad (1.30)$$

Donde a, b, \dots, n son las respectivas fracciones de un área típica compuesta de diferentes recorridos cuyas transmitancias son U_a, U_b, \dots, U_n .

Si el calor puede fluir lateralmente en una capa continua de modo que resulten planos isotérmicos transversales, la resistencia total promedio $R_{T(prom)}$ será la suma de las resistencias de las capas entre dichos planos, siendo calculada cada capa por la ecuación apropiada (1.23) o una modificación de la ecuación (1.27), usando los valores de resistencias. Esta es una combinación de capas en serie, de las cuales una (o más) provee una trayectoria paralela.

La transmitancia calculada, asumiendo únicamente flujo de calor en paralelo, por lo general es considerablemente más baja que la calculada cuando se asume un flujo de calor combinado en serie-paralelo. La transmitancia real será un valor entre los valores calculados. En ausencia de valores de ensayos para la combinación, debe usarse un valor intermedio; normalmente una evaluación de la construcción o de la estructura mostrará que se debe usar un valor más cercano ya sea al mayor o al menor valor calculado. Generalmente, si la construcción contiene una capa con una alta conductividad en la cual la conducción lateral es muy alta en comparación con la transmitancia a través de la pared, se debe usar un valor más cercano al obtenido en los cálculos de la combinación en serie-paralelo. Sin embargo, si no hay una capa con alta conductancia lateral, debe usarse un valor más cercano al obtenido en los cálculos del flujo de calor en paralelo.¹³

¹³ASHRAE. Fundamentals HandBook Heat Transfer. 2005. Cap. 3.

1.4. FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DE PANELES QUE CONTIENEN METAL

Existen estructuras las cuales están compuestas de diversos materiales, entre estos metales los cuales poseen una alta conductividad por esta razón La transmitancia de un panel que involucre este tipo de materiales de alta conductividad que atraviese total o parcialmente el aislamiento debe ser determinado, si es posible, por ensayos en la *Caja Caliente*.

1.4.1. Método de la SNAME

El panel 0-28 de la Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos (SNAME), ha investigado sobre el uso y aplicación de distintos materiales aislantes, con el propósito de obtener las condiciones de confort requeridas al menor costo posible.

A continuación se describe el método utilizado con el fin de determinar el aislamiento requerido para embarcaciones navales para distintas ratas de transferencia de calor a diferentes temperaturas considerando la economía de la instalación, construcción, mantenimiento y peso.

El aislamiento térmico de embarcaciones involucra la aplicación combinaciones de materiales, de ahora en adelante conocidos como “construcciones”, integradas por paneles, cavidades de aire, recubrimientos, revestimientos de cubierta, y otros materiales que también se pueden utilizar como aislamientos térmicos. Las propiedades de dichas construcciones se deben tener en cuenta para determinar las características del aislamiento que satisfará la diferencia de temperatura de diseño.

La metodología de la SNAME es una guía para la correcta selección del tipo y espesor del aislamiento térmico y la construcción para el diseño de nuevas embarcaciones, y para determinar los gradientes de temperaturas predominantes y el resultante Coeficiente Global de Transferencia de Calor “U” a través de varios paneles o fronteras

de la embarcación, bajo una código o norma que establezca la temperatura de confort tanto en la temporada de calefacción como en la de enfriamiento.

Además es la guía para la selección de las temperaturas ambientes de los compartimientos de las embarcaciones marinas, temperaturas de diseño exterior para radiación solar, aire exterior y agua de mar, también indica la máxima diferencia de temperatura admisible entre dos compartimientos. Esta máxima diferencia de temperatura puede ocurrir en la temporada de calefacción como en la temporada de enfriamiento.¹⁴

La tabla 1.2. Indica los valores máximos sugeridos de "U", para cada detalle de la construcción que representa la tasa de transmisión de calor en (BTU / hr / pie ² / ° F), en base a los requisitos de aislamiento de cubiertas de acero, mamparas y carcasas dentro de la diferencia de temperatura rango mostrado. Cualquier otro tipo de construcción que se muestra en las tablas de valores de "U", y que es adecuado para los fines previstos, tales como mamparas y particiones secundarias es aceptable, siempre y cuando su valor "U" no exceda el máximo indicado por la diferencia de temperatura particular en cuestión.¹⁵

Tabla 1. 2. Valores máximos de “U” según el rango de temperaturas

Diferencia de temperaturas °F	Valores máximos "U"
0°-15°	1.75
16°-30°	0.37
31°-50°	0.26
sobre 50°	0.16

Fuente: Thermal Insulation Report (SNAME).

¹⁴ Tesis de Grado. diseño de una instalación experimental tipo caja caliente para el estudio de las propiedades de transferencia de calor. Alfredo de Ávila .2009

¹⁵ Thermal Insulation Report (SNAME), Table 1.

Es importante recordar que la tasa de transferencia de calor es inversamente proporcional al espesor del aislamiento. El calor obstruido disminuye rápidamente con espesores de aislamiento de casi dos pulgadas. En vista de este rápido decrecimiento es más económico recubrir el refuerzo y las bridas para obtener un flujo global de calor entre los límites de la Tabla 1-2., que incrementar el espesor de la superficie plana del área de aislamiento entre los refuerzos más allá de una cantidad razonable. El flujo de calor a través de los refuerzos depende de varios factores, y por esa razón no se puede evaluar como una relación lineal.

Uno de los más importantes y complejos problemas que presenta el diseño del aislamiento para los diseñadores marinos es la de proveer condiciones satisfactorias para todas las temporadas. Se debe tener mucho cuidado al seleccionar el tipo y cantidad de construcciones para garantizar la mínima transferencia de calor bajo las condiciones en las que hay una mayor diferencia de temperatura considerando las variables que involucra la temporada (Calefacción o Enfriamiento). La mayor diferencia de temperatura entre un compartimiento y el espacio contiguo generalmente ocurre durante la temporada de enfriamiento, mientras que los otros dos compartimientos contiguos presentan la mayor diferencia de temperatura durante la temporada de calefacción.

El calor es una forma de energía que se transfiere, como resultado de una diferencia de temperatura, mediante convección, conducción o radiación. Para evaluar el calor ganado o el calor cedido se ha combinado estos tres tipos o modos de transferencia de calor en un Coeficiente Global de Transferencia de Calor, “U”, para los distintos tipos de construcciones, sin embargo cuando se calcula o se evalúa el coeficiente global este se subdivide en cuatro grupos como se muestra a continuación:

a) Superficie hacia el Aire Interior: este coeficiente evalúa el efecto de la transferencia de calor de la temperatura superficial de un lado hacia la temperatura del aire al otro lado. El uso de las temperaturas superficiales solo se limita a los cálculos para la temporada de enfriamiento, radiación solar en la cubierta o en los mamparos expuestos al sol. Bajo estas condiciones solo se considera la conductancia térmica y el

coeficiente pelicular de los refuerzos del mamparo o del casco, mientras que el coeficiente pelicular de la superficie plana del mamparo o casco se desprecia.

b) Aire Exterior hacia el Aire interior: este coeficiente evalúa el efecto de la transferencia de calor a través de la estructura de la embarcación desde la temperatura del aire de los compartimientos hacia la temperatura del aire exterior en la temporada de calefacción. Para el cálculo de este coeficiente se evalúa la conductancia y el coeficiente pelicular de los refuerzos. Y se utiliza 7.0 BTU/hft²°F como coeficiente pelicular de la superficie plana cuando los mamparos o el casco están expuestos al ambiente exterior. Este es un coeficiente promedio que evalúa el aire a una velocidad de 15 mph bajo la lluvia o rocío. Este coeficiente también evalúa el efecto de la transferencia de calor desde la temperatura externa hacia la temperatura del aire interior de los compartimientos con aire acondicionado, cuyas paredes (Mamparos, casco o cubierta) no se encuentran expuestos a radiación solar durante la temporada de enfriamiento.

c) Aire Interior hacia Agua de mar: este coeficiente evalúa el efecto de la transferencia de calor a través o desde el recubrimiento de los compartimientos hasta el agua de mar durante la temporada de calefacción. Se calcula la conductancia térmica y los coeficientes peliculares de superficies planas y de los refuerzos, para el coeficiente de superficies planas generalmente se utiliza 37 BTU/hft²°F en la temporada de enfriamiento y 25 BTU/hft²°F en la temporada de calefacción.

d) Aire Interior hacia Aire Interior: este coeficiente evalúa la transferencia de calor a través de los compartimientos de la embarcación. El cálculo de la conductancia y de los coeficientes peliculares aplica para la evaluación de este coeficiente.¹⁶

1.4.2. Método de la zona

Para estructuras con elementos metálicos ampliamente espaciados de área de sección transversal sustancial. Para estas construcciones, el método de la zona se puede utilizar.

¹⁶Thermal Insulation Report (SNAME)

Este método implica dos cálculos separados-uno para una parte limitada, la Zona A, que contiene el elemento altamente conductor o metálico, y el otro para la parte restante de la construcción más simple, la zona B, los dos cálculos se combinan entonces con el método de flujo paralelo, y él se calcula la transmitancia media por unidad de área en general. Las leyes básicas de transferencia de calor se aplican mediante la adición de las conductancias de área CA de elementos en paralelo, y la adición de resistencias de la zona R /A de elementos en paralelo, y la adición de resistencias R /A de elementos en serie.¹⁷

La forma de la superficie de la zona A se determina por el elemento de metal contenido en el área, la zona A es la superficie de una tira de la anchura W que está centrado en el haz. El valor de W se calcula a partir de la Ecuación (1), que es empírica. El valor de d no debería ser inferior a 13 mm de aire en calma.

$$W = m + 2d \quad (1.31)$$

Donde,

m = Ancho o diámetro del final de la trayectoria de calor en el metal, en pulgadas

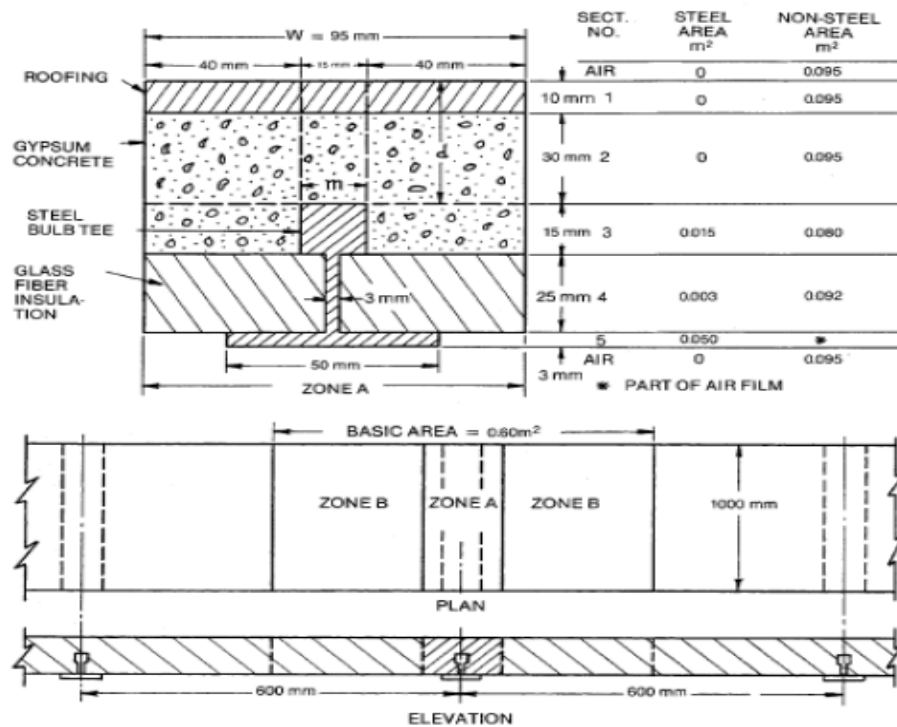
d = Distancia desde la superficie del panel al metal, en pulgadas. El valor de d no deber ser tomado menor a 0,5 pulgadas (para aire quieto).

En general, el valor de W debe ser calculado por la ecuación (1.31) para cada extremo de la trayectoria de calor del metal, y debe usarse el valor más grande en los límites del área fundamental como se muestra en el siguiente ejemplo:

En el siguiente ejemplo ilustraremos la aplicación del método de la zona, en un sistema de aislamiento térmico integrado por varias barras en T separadas 600mm, cada barra soporta una placa compuesta de fibra de vidrio, hormigón de yeso y una lámina de techo prefabricada, aplicando el método se calculó la transmitancia o coeficiente global de transferencia de calor de la estructura que corresponde a la cubierta o techo de una azotea (**Figura 1.4**), tomaremos valores de conductividades de : Acero, 45W/(m.K);

¹⁷ASHRAE. Fundamentals HandBook Heat Transfer. 2001. Cap. 25.

concreto de yeso, $0.24 \text{ W}/(\text{m.K})$; y fibra de vidrio $0.036 \text{ W}/(\text{m.K})$; y finalmente la conductancia del techo prefabricado ya que es un material compuesto es $14 \text{ W}/(\text{m.K})$;



Fuente: ASHRAE, Fundamentals, Cap. 25.

Figura 1. 4. Cubierta de Techo

El área de la base es de 0.6m^2 con un perfil o barra en forma de T en medio de la estructura, Teniendo en cuenta que la barra es de acero se determinara la Zona A (Alta conductividad) y la Zona B a partir de la ecuación (31):

$$\text{Lado Superior } W = m + 2d = 15 + (2 \times 40) = 95 \text{ mm}$$

$$\text{Lado Superior } W = m + 2d = 15 + (2 \times 13) = 76 \text{ mm}$$

Se debe usar el mayor valor de W que corresponde al Lado superior para garantizar que la Zona A delimite completamente el área de mayor conductividad.

Entonces el área de la Zona A es $= \left(1.0 \times \frac{95}{100}\right) = 0.095m^2$, y finalmente el área de la zona B será igual al área total de la muestra menos el área de la Zona B

$$\text{Área de la zona B} = \text{AreaTotal} - \text{AreaZonaA}$$

$$\text{Área de la zona B} = 0.06m^2 - 0.095m^2 = 0.505m^2$$

Para determinar la transmitancia del área de la Zona A, se divide la estructura de la zona en cinco secciones paralelas a las superficies superior e inferior como se muestra en la **figura 1.4**. La conductancia del área $C \cdot A$ de cada sección se calcula sumando las conductancias de área de las trayectorias por el metal y por la parte no metálica. Las conductancias de área de las secciones se convierten a resistencias de área mediante la expresión $1/(C \cdot A)$, sumándose para obtener la resistencia total de la zona A.

Sección	AXC	CA	1/CA=R/A
Aire (Exterior, 24Km/h)	0,095X34	3.32	0.31
No.1, Techo	0,095X17	1.62	0.62
No.2, Concreto de Yeso	0,095X0,24/0,03	0.76	1.32
No.3, Acero	0,015X45/0,015	45	0.022
No.3, Concreto de Yeso	0,08X0,24/0,015	1.28	0.181
No.4, Acero	0,003X45/0,025	5.4	0.181
No.5, Fibra de vidrio	0,092X0,036/0,025	0.13	0.002
No.5, Acero	0,050X45/0,005	450	1.14
Aire (Interior)	0,095X9,26	0.88	

$$\text{Total } R/A = 3.59$$

$$\text{Transmitancia de la zona A} = \frac{1}{\frac{R}{A}} = \frac{1}{3.59} = 0.279 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Para la zona B, se suman las resistencias unitarias y luego se convierten a transmitancia de área como se muestra en la tabla:

<i>Sección</i>	<i>Resistencia, R</i>
<i>Aire(Exterior,24Km/h)</i>	$1/34=0.029$
<i>Techo</i>	$1/17=0.059$
<i>Concreto de Yeso</i>	$0.045/0.24=0.188$
<i>Fibra de vidrio</i>	$0.025/0.036=0.694$
<i>Aire (Interior)</i>	$1/9.26=0.108$
	<i>Resistencia</i>
	<i>Total=1.078</i>

$$\text{Transmitancia de la zona A} = \frac{1}{\frac{R}{A}} = \frac{1}{(3.59/0.505)} = 0.468 \text{ W/m}^2\text{K}$$

La transmitancia de toda el área será igual a la transmitancia de la Zona A más el área de transmitancia de la Zona B.

La transmitancia o Coeficiente global de la sección de la Azotea es:

$$U = 0.279 \text{ W/m}^2\text{K} + 0.468 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U = 0.747 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Y la resistencia Global es:

$$R = 0.80 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Nota: Un panel con una estructura metálica interna, unida en uno o ambos lados a una cubierta o revestimiento metálico, presenta un problema especial de flujo de calor lateral que no cubre el *Método de Zona*.¹⁸

1.4.3. Flujo de calor en serie a través de áreas desiguales

Una construcción puede estar compuesta de dos o más capas (planas o de curvaturas pequeñas) de áreas desiguales, separadas por un espacio de aire y colocadas para que el calor fluya en serie a través de las capas. La construcción más común de este tipo es una combinación de techo y tejado dónde el espacio del ático no es calentado ni ventilado. Se puede calcular un coeficiente combinado basado en el área más conveniente desde el aire interior al aire exterior mediante la ecuación:

$$R_T = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{n_2 U_2} + \frac{1}{n_3 U_3} + \dots + \frac{1}{n_p U_p} \quad (1.32)$$

El coeficiente combinado U es el recíproco de R_T , es decir, como ya se mencionó

$$U = 1/R_T.$$

Dónde:

U = Coeficiente combinado para ser usado con A_1

R_T = Resistencia total de todos los elementos en serie.

U_1, U_2, \dots, U_p = Coeficiente de transmisión de A_1, A_2, \dots, A_p respectivamente.

n_2, n_3, \dots, n_p = Relaciones de áreas $A_2 / A_1, A_3 / A_1, \dots, A_p / A_1$ respectivamente.

En el cálculo, se debe contabilizar la resistencia de los espacios de aire entre las capas asignándole la mitad de una resistencia del espacio de aire apropiada para cada una de las capas, en lugar de la conductancia de la superficie.

¹⁸ASHRAE. Fundamentals HandBook Heat Transfer. 2001. Cap. 25.

1.4.4. Concepto de U_o

En la sección 4 de la norma 90-75 de la ASHRAE: Conservación de la Energía en Diseños de Nuevos Edificios, se establecen los requerimientos en términos de U_o , donde U_o es la transmitancia térmica combinada de las áreas respectivas de un montaje de una pared gruesa exterior, de un tejado/techo, o de un piso. Para una pared la ecuación de U_o es:

$$U_o = \frac{U_{pared}A_{pared} + U_{vent}A_{vent} + U_{puerta}A_{puerta}}{A_o} \quad (1.33)$$

Dónde:

U_o = La transmitancia térmica promedio del área de la pared gruesa, Btu/h*ft² *°F

A_o = El área exterior de la pared gruesa, ft²

U_{pared} = La transmitancia térmica de todos los elementos del área opaca de la pared, Btu/h*ft² *°F

A_{pared} = Área opaca de la pared, ft²

U_{vent} = La transmitancia térmica del área de la ventana, Btu/h*ft² *°F

A_{vent} = Área de la ventana (incluyendo el bastidor o marco), ft²

U_{puerta} = La transmitancia térmica de del área de la puerta, Btu/h*ft² *°F

A_{puerta} = Área de la puerta, ft²

Nota: Donde se use más de un tipo de pared, ventana o puerta, el termino $U \times A$ para ese caso, se desarrollará en sus sub-elementos como:

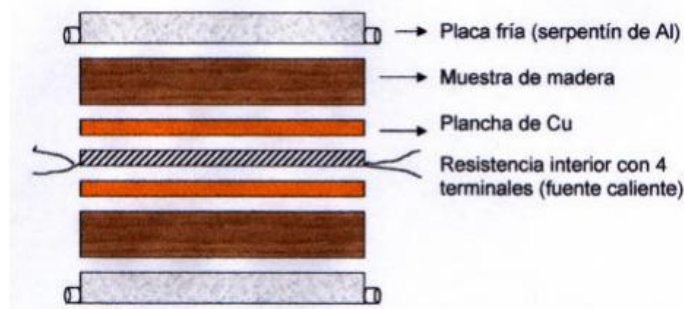
$$U_{pared_1}A_{pared_1} + U_{pared_2}A_{pared_2}, etc \quad (1.34)$$

1.5. METODOS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR PROPIEDADES TERMICAS

A continuación se describirán diferentes métodos validados para determinar propiedades térmicas de materiales homogéneos y no homogéneos.

1.5.1. Método de la placa caliente

Como su nombre lo indica consiste esencialmente en una fuente caliente constituida por una placa calefactora que comprende una parte central y un anillo de guarda separados por un espacio no mayor de 3 mm. Esta fuente caliente está colocada en el centro del equipo. La fuente caliente se alimenta por medio de 4 conductores eléctricos (2 que van a la parte central y 2 que van al anillo de guarda). Estos conductores van conectados a 2 variadores de tensión que permiten una alimentación progresiva de la corriente eléctrica que irá calentando paulatinamente la placa caliente. De este circuito eléctrico se medirán permanentemente la tensión y la corriente. A ambos lados de la placa caliente se colocan 2 placas de material conductor (preferentemente cobre, pudiendo utilizarse aluminio u otros) con el objeto de formar una superficie homogénea de transmisión del calor. Luego, saliendo hacia fuera se colocan sendas probetas del material a experimentar, y luego de las probetas, hacia fuera, se colocan planchas que hacen de fuente fría. Estas fuentes frías tienen serpentines por donde circula el agua de la red a efectos de mantener constante la temperatura. En ambos caras de la probeta a ensayar deben colocarse termocuplas en número suficiente para registrar permanentemente las temperaturas de la cara fría y de la cara caliente. Todo en conjunto va rodeado de un material aislante para que no se produzcan fugas de calor al exterior. Se forma así una especie de emparedado horizontal formado por varias capas, donde el calor se produce eléctricamente en el centro y se va transmitiendo hacia ambos lados externos por conducción.



Fuente: Artículo científico Fabricación de un equipo de placa caliente para determinación de la conductividad térmica de materiales.

Figura 1. 5. Esquema representativo de un equipo de placa caliente

Existen diversas normas internacionales que rigen la construcción y el funcionamiento de los equipos de placa caliente para la determinación de la conductividad térmica de los materiales. Una de las normas más importantes son las ASTM (American Standards for Testing Materials). La norma que rige la construcción y el funcionamiento de un equipo de placa caliente es la ASTM C177-85 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot Plate Apparatus. Entre las especificaciones más importantes para materiales homogéneos de espesor inferior a 10 cm se pueden nombrar:

- El método se aplica a materiales cuya conductividad no exceda de $0,62 \text{ Kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$
- Las temperaturas del ensayo estarán comprendidas entre $-45 \text{ }^\circ\text{C}$ y $760 \text{ }^\circ\text{C}$
- El aislamiento exterior que rodea al anillo de guarda debe tener una resistencia de, por lo menos, el doble de la resistencia térmica de la placa del material que se ensaya.
- Los termopares serán de alambre cuyo diámetro no exceda de $0,57 \text{ mm}$
- El potenciómetro tendrá una sensibilidad mínima de 5 milésimas de mili voltio.
- La diferencia de temperaturas entre la cara caliente y la cara fría debe ser como mínimo de $22 \text{ }^\circ\text{C}$
- La atmósfera que rodea al ensayo debe tener como mínimo un punto de rocío superior a la temperatura más baja del aparato (para ambiente de la sala de

laboratorio de 20 °C y 50% de humedad relativa, el punto de rocío es de 9 °C aproximadamente).¹⁹

1.5.2. Método de la caja caliente

El método de la caja caliente (Hot Box) es un método de medición cuyos principios, procedimientos y aplicaciones son dados por la Norma ASTM C 236 – 89 y ASTM C 976. Esta norma se refiere a la medición de las propiedades de transferencia de calor en estado estable de paneles, ensamblajes de construcción y otras estructuras verticales. Es decir, el método de la caja caliente se utiliza para determinar la conductancia C , la transmitancia térmica U , y la resistencia térmica, R , de cualquier muestra conociendo el área, A , el flujo de calor, q , y la diferencia de temperaturas, la velocidad de aire.

Existen dos tipos de caja caliente, la caja caliente con guarda (Un método absoluto) y la caja caliente calibrada (un método secundario similar en forma pero con la diferencia que requiere calibración usando materiales de conductancia conocida), el principal objetivo de una caja caliente es estudiar el desempeño térmico de envolventes de construcción civil como paredes, ventanas y en general cualquier tipo de aislamiento térmico, realizando simulaciones de las condiciones térmicas a las que estas serán expuestas realmente.

Tanto el método de la caja caliente con guarda como la calibrada son capaces de medir la transmitancia térmica o coeficiente global de transferencia de calor “ U ” de componentes de edificaciones tales como: ventanas (con y sin marco), paneles de puertas, ventanas de techos, marcos, ladrillos y estructuras complejas (no homogéneas, con aislamientos y/o con cavidades de aire).

¹⁹ Artículo científico Fabricación de un equipo de placa caliente para determinación de la conductividad térmica de materiales. Grupo de Investigación en Energías Renovables (Gider). UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE. 2003

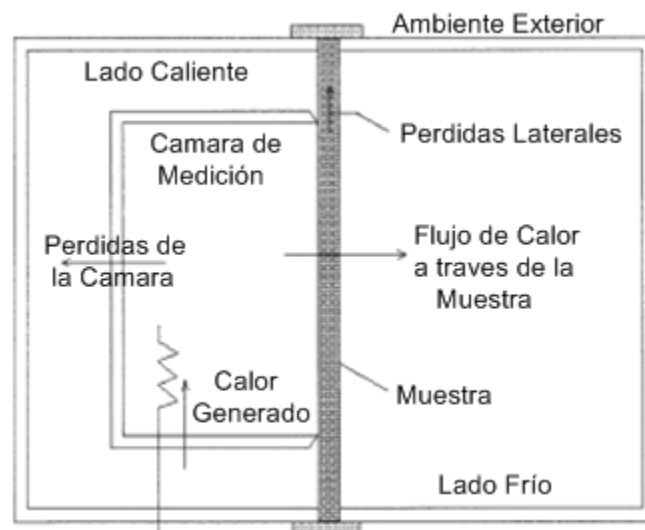
La ventaja que posee el método de la caja caliente frente a otros equipos de mediciones de propiedades térmicas, es que se tienen en cuenta los efectos de borde de las estructuras (marcos de ventanas, espaciadores entre otros), al momento de realizar los balances energéticos para poder determinar con mayor exactitud este tipo de materiales no homogéneos.

1.5.2.1. Caja caliente con guarda

Básicamente este tipo de caja caliente cuenta con cuatro componentes principales:

- Caja del Lado frío
- Caja del Lado caliente
- Marco central
- Caja de medición (metering box)

La caja de medición (metering box) cubre un área representativa del panel la cual es rodeada por una caja de guarda exterior la cual permite que las condiciones de temperatura y flujo de aire dentro de la caja de guarda reduciendo la transferencia de calor a través de las paredes de la caja de medición hasta niveles despreciables.



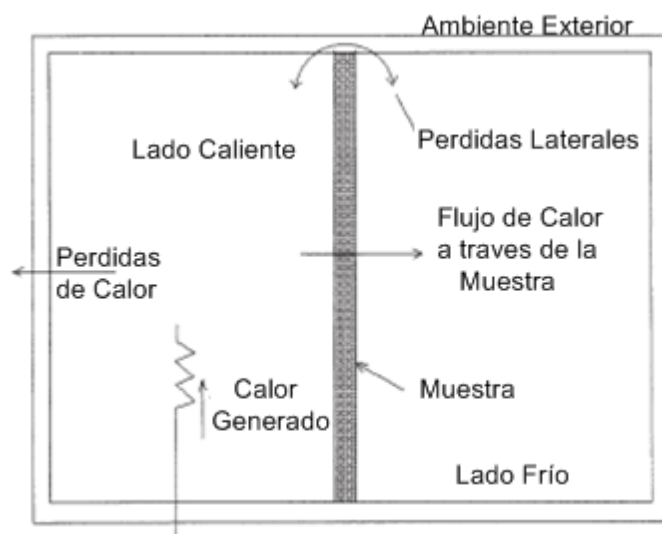
Fuente: Norma ASTM C1363

Figura 1. 6. Esquema de una Caja caliente con Caja de Guarda

1.5.2.2. Caja caliente calibrada

A diferencia de la caja caliente con guarda en la caja caliente calibrada no hay caja de medición interior, reduciendo sus componentes a ser solo la caja del lado caliente, la caja del lado frío y el marco central. Las paredes exteriores de la caja caliente son construidas de un material aislante con un espesor suficiente para reducir al mínimo las pérdidas de calor; La energía o flujo de calor que atraviesa la muestra se obtiene mediante la corrección apropiada de la energía medida en la cámara caliente.

Idealmente el diseño de ambos tipos de caja caliente debe contar con un sistema que permita someter a las estructuras o muestras en diferentes orientaciones, para simular los efectos causados por la convección como el caso de los tejados o cubiertas.



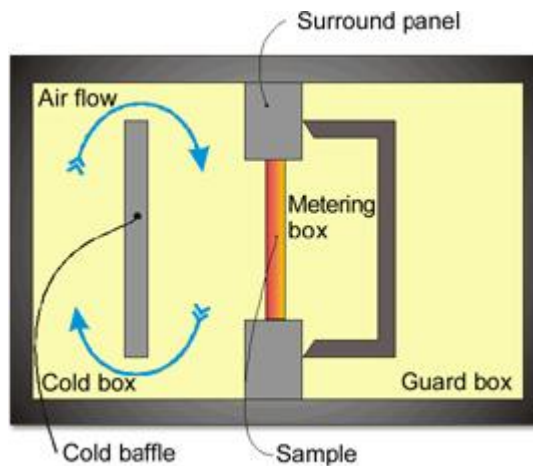
Fuente: Norma ASTM C1363

Figura 1. 7. Esquema Caja Caliente Calibrada

1.5.2.3. Funcionamiento de la Caja Caliente

Básicamente el funcionamiento de la caja caliente consiste en colocar una muestra a evaluar en el panel o marco central, luego se instrumenta la muestra en ambas

superficies con sensores de temperatura colocados de tal manera que proporcionen una distribución representativa a través de la superficie del panel, estos sensores se colocan los sensores en la misma posición pero en los lados opuestos de la muestra. Posterior a esto se coloca el panel central entre la cámara caliente y fría las cuales operan en condiciones de temperatura, flujo de aire y humedad controladas; finalmente se colocan sensores de temperatura en posiciones estratégicas de ambas cámaras, como en los deflectores; también se miden las temperaturas del aire y las temperaturas de las zonas radiantes.



Fuente: Evitherm

Figura 1. 8. Esquema de funcionamiento de la caja caliente con guarda

En el lado frío hay un sistema de ventilación para producir un flujo de aire uniforme a lo largo de la muestra. En el lado caliente, la caja de medición se coloca contra la muestra (cuando es una Caja Caliente con Guarda). La temperatura en la caja de medición se controla mediante la entrada de energía proporcionada (usando una resistencia eléctrica y un ventilador pequeño para prevenir la estratificación de la temperatura). Se mide el flujo de energía entre la caja de medición y la caja de guarda. Se controla la temperatura en la caja de medición de tal forma que el flujo de energía medido entre la caja de medición y la caja de guarda sea igual a cero.

Cuando ése es el caso, toda la energía que entra a la caja de medición fluirá a través de la muestra que está siendo evaluada y a través de una pequeña parte del panel de contorno (Surrounding panel). El flujo de energía a través del panel de contorno se puede determinar mediante la calibración de la caja caliente. La norma ASTM C1363

proporciona un método para determinar las pérdidas laterales que se producen por la interacción de la muestra con el panel de contorno. De esta manera se puede determinar exactamente el flujo de energía a través de la muestra.

También se determinan la temperatura radiante y la temperatura del aire en ambos lados de la muestra. Teniendo en cuenta el factor de vista (o de forma en la radiación) para el intercambio radiante entre la muestra y el entorno caliente y frío, se determina la transmitancia térmica (Coeficiente Global “U”) de la muestra.

Las mediciones se hacen en condiciones de estado estable de temperaturas del aire y las superficies y la entrada de energía a la cámara de aire del lado caliente. Normalmente las temperaturas radiante y del aire que se alcanzan en ambos lados de la muestra son ligeramente diferentes de los valores estandarizados. La norma también provee un método de cálculo para determinar el valor de U en ambientes estandarizados. Este es el valor final de U que puede usarse para comparación del producto.²⁰

1.5.2.4. Diferencias entre la caja caliente con guarda y la caja caliente calibrada

En la caja caliente con caja de guarda, la caja de medición central (metering box) que cubre un área representativa del panel es rodeada por una caja de guarda exterior (**ver figura 4**). Las condiciones de temperatura y flujo de aire en la caja de guarda se establecen de tal manera que reduzcan la transferencia de calor a través de las paredes de la caja de medición hasta niveles despreciables. La energía total medida de todas las fuentes en la caja de medición se toma como la energía a través de la muestra (con algunas correcciones pequeñas)

En la caja caliente calibrada no hay caja de medición interior. Las paredes exteriores de la cámara caliente se hacen con un aislamiento muy grueso para minimizar las pérdidas por conducción; el flujo de energía a través de esas paredes se mide para un rango de la cámara caliente y de temperaturas de laboratorio, usando paneles de calibración. La

²⁰Tesis de Grado. diseño de una instalación experimental tipo caja caliente para el estudio de las propiedades de transferencia de calor. Alfredo de Ávila .2009

energía a través de la muestra se obtiene entonces, mediante la corrección apropiada de la energía medida en la cámara caliente. Idealmente, estos equipos deben ser diseñados para que puedan realizar medidas en diferentes orientaciones, para incluir los importantes efectos de la convección que puede ser un componente significativo de la transferencia de calor, particularmente en muestras de tejados o cubiertas.

1.6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

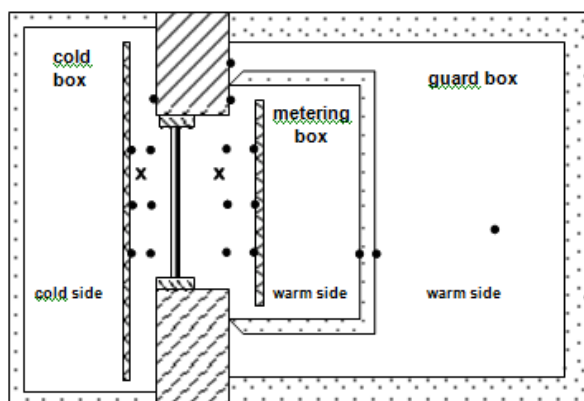
1.6.1. Investigación previa evaluaciones experimentales en cajas calientes

1.6.1.1. Caja caliente TNO “Calibration of the TNO guarded hot box as specified in ISO 12567-1:2000”

La instalación consta de una caja de protección caliente fija, una caja de medición móvil, un panel de sonido envolvente con una abertura de 1,25 x 1,50 m para montar la muestra, y una caja fría fija.

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando dos paneles vidriados de calibración con un espesor de 20 mm y 60 mm. Tamaño de muestras: 1200 x 1200 mm.

Los procedimientos de medición en EN-ISO 12567-1:2000 requieren que el panel envolvente que se utiliza para mantener la muestra de ensayo debe ser calibrado llevando a cabo una medición caja caliente de al menos dos paneles vidriados de calibración con diferentes espesores.



Fuente: Artículo TNO

Figura 1. 9. Distribución de sensores caja caliente TNO

El cuadro del lado caliente tiene las siguientes dimensiones:

Profundidad $D = 1,25$ m.

Ancho $W = 3,20$ m.

Altura $H = 3,75$ m.

La caja de protección caliente está aislada de su entorno con 40 cm de aislamiento.

El cuadro de frío tiene las siguientes dimensiones:

Profundidad $D = 2,35$ m.

Ancho $W = 3,20$ m.

Altura $H = 3,75$ m.

La caja fría está aislada de su entorno con 40 cm de aislamiento. En la caja fría se colocan dos ventiladores para controlar la velocidad del aire.

La caja de distribución tiene las siguientes dimensiones:

Profundidad $D = 0,61$ m.

Ancho $W = 1,97$ m.

Altura $H = 2,22$ m.

Cada cara del contrachapado está formada por 2 capas de madera de 6 mm adherida y después pegado a la EPS. El espesor total del panel envolvente es exactamente 224 mm.

En la abertura del panel se coloca el envolvente 660 mm por encima del nivel del suelo y tiene una anchura de 1250 mm, y una altura de 1500 mm. En el caso de las muestras más pequeñas y/o paneles de calibración, la abertura puede hacerse más pequeña utilizando un inserto de la misma composición que el resto del panel envolvente.

Los paneles de calibración se construyeron a partir de poliestireno expandido (EPS) emparedada entre dos paneles de vidrio.

El espesor de cada panel se midió en 20 lugares diferentes igualmente distribuidos sobre la superficie de los paneles.²¹

1.6.1.2. Caja caliente con guarda Branz (Nueva Zelanda) “Thermal resistance of a block wall”

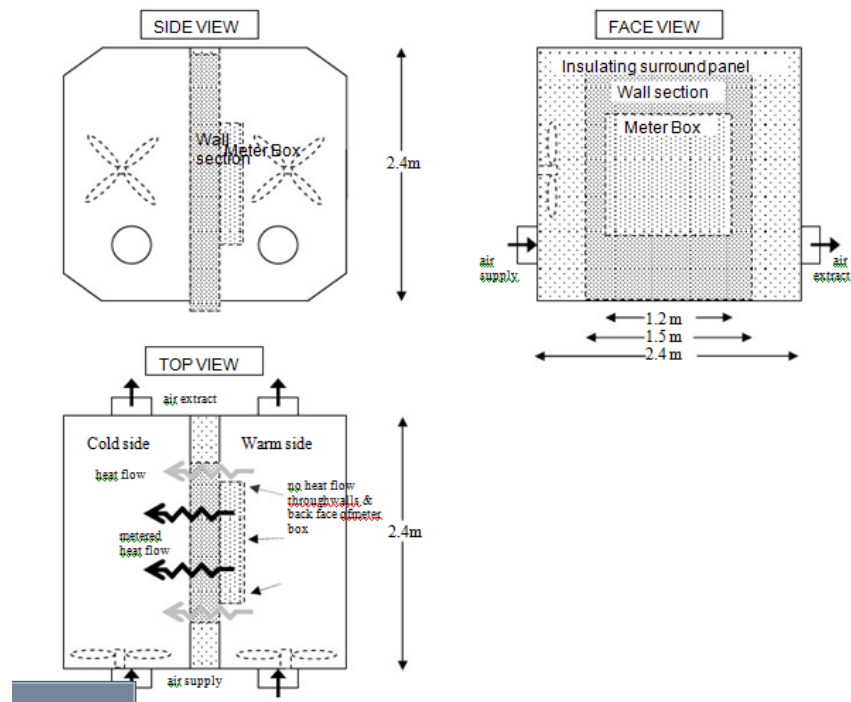
El laboratorio de la BRANZ de Nueva Zelanda posee una caja caliente para determinar coeficientes globales de transferencia de calor y conductividades térmicas, a materiales de construcción civil.



Fuente: Laboratorio BRANZ

²¹R. Versluis, M Sc. HP. Oversloot (2005): Calibration of the TNO guarded hot box as specified in ISO 12567-1:2000. Artículo de la Organización Holandesa para la investigación científica aplicada. Mayo, pagina 1-34.

Figura 1. 10. Caja caliente BRANZ



Fuente: Laboratorio BRANZ

Figura 1. 11. Esquema de caja caliente BRANZ

El equipo de prueba fue el Branz Guard Hot Box y consta de dos cámaras aisladas de área de aproximada de 2,4m x 2,4m, con una profundidad interna de 1,2m. Las paredes de la cámara incluyen 100 mm de aislamiento de espuma rígida ($R= 4\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{W}$).

Las caras abiertas de las cámaras se mantienen contra las caras de la muestra. El panel envolvente se construyó de aislamiento de espuma rígida y tenía un R estimado en $5\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{W}$. La temperatura del aire en las dos cámaras es controlada independientemente usando un equipo de calefacción y de refrigeración que está conectado a las cámaras a través de conductos de extracción en los lados opuestos de cada cámara. El lado caliente consta de una resistencia eléctrica más un ventilador de rotación lenta, el lado frío igualmente tiene un ventilador con las mismas características.

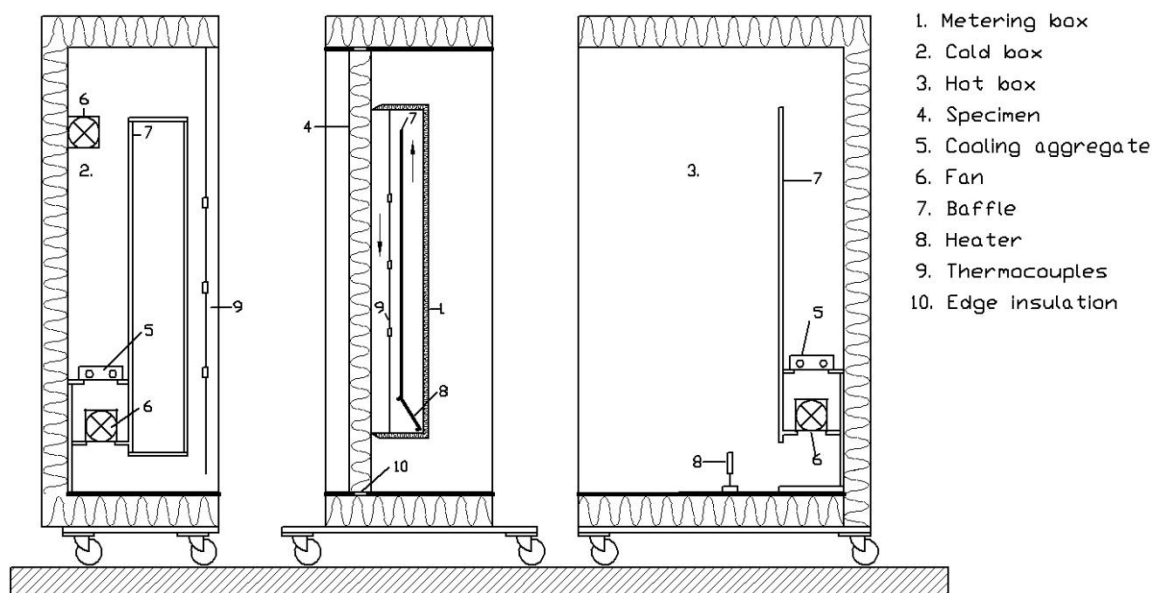
La caja de medición tiene un área de 1,2 m x 1,2m con 250mm de profundidad. La caja caliente utiliza como material aislante espuma rígida, además la diferencia de

temperatura de aire-aire entre las dos cámaras se mide utilizando 16 pares de termopares de tipo T, se utiliza un sistema de adquisición y control, toma de muestras cada 5 segundo y grabación a intervalos de 1 minuto.²²

1.6.1.3. Caja caliente de TUD (Dinamarca) “Validating Numerical Calculations Against Guarded Hot Box Measurements”

Esta caja caliente es de la Universidad Técnica de Dinamarca (TUD), es una caja caliente con guarda que tiene como área 1,2 X 1,8m, en la cual se analizan materiales de construcción que poseen diferentes puentes térmicos lineales.

Esta caja cumple con los criterios de la norma EN ISO 8990 "Aislamiento térmico, determinación del estado de equilibrio las propiedades de transmisión térmica, calibrada y con guarda la caja caliente" (Comité Europeo de Normalización, 1996a). Los cálculos numéricos se realizan mediante dos programas de simulación, los cuales han sido validados de acuerdo con la norma EN ISO 10211-1.



Fuente: Article validating numerical calculations against guarded hot box measurements.

²² Ian Cox Smith (2007): Thermal resistance of a block wall. Artículo realizado por BRANZ. Mayo, pagina 1-9.

Figura 1. 12. Sección transversal de la caja caliente vigilado

En la caja caliente con guarda, el cuadro de medición está rodeado por una caja de guardia en el cual se controla el ambiente para minimizar el flujo de calor lateral en la muestra y el flujo de calor a través de las paredes de la caja de medición. Un regulador PID simplificado basado en la diferencia de temperatura medida durante las paredes de la caja de medición, controla el medio ambiente en el cuadro de guardia.

La caja fría se mantiene a una temperatura de 0°C y esta temperatura es estable dentro de aproximadamente 0,5% de la diferencia de temperatura en general, cuando toda la medición ha alcanzado la estabilidad. La inestabilidad relativamente alto de esta temperatura es debido al hecho de que ningún regulador PID se utiliza para controlar esta temperatura.

La caja de distribución se mantiene a una temperatura ambiental, es decir, la temperatura "medida" por la muestra, de 20.55°C, utilizando el mismo controlador PID que se utiliza para el cuadro de guardia. En este caso, el controlador se basa en la temperatura real medida en el cuadro de medición. Esta temperatura es estable dentro de aproximadamente 0,05% de la diferencia de temperatura global. La alta estabilidad en esta temperatura se consigue mediante un regulador PID.

La resistencia de la superficie en el lado frío se establece mediante el control de la velocidad del viento a lo largo de la muestra utilizando un ventilador. En el lado caliente de la muestra la resistencia de la superficie se induce automáticamente por la rotación del aire en el cuadro de medición. Las resistencias de la superficie se mantienen en valores de aproximadamente $0,04\text{m}^2\text{K/W}$ en el lado frío y $0,13\text{m}^2\text{K/W}$ en el lado caliente. Los cálculos se realizaron utilizando HEAT2 (espécimen 1, 2 y 8) y HEAT3 (espécimen 3, 4, 5, 6, 7 y 9). Ambos de estos programas utilizan el método de diferencias finitas (FDM), lo que significa que la geometría se limita a las formas rectangulares. Esto no representa un problema, ya que todas las muestras que fueron

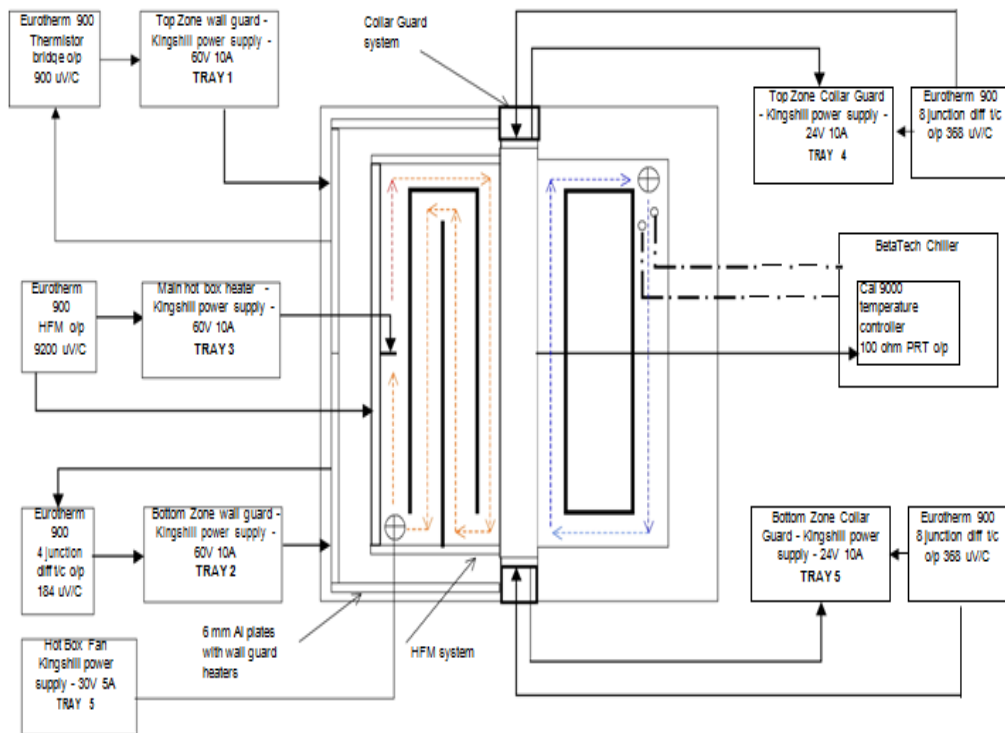
medidas podrían tener como modelo a partir de formas rectangulares o mediante el uso de simplificaciones que no alteran el flujo de calor en general de manera significativa.²³

1.6.1.4. Caja caliente con guarda rotatable de NPL (Inglaterra) “Validation of the NPL rotatable wall guarded hot box with horizontal heat flow”

El Aparato rotativo de cajas caliente con guarda (RWGHB) ha sido diseñado y construido en la NPL. El aparato está diseñado para realizar mediciones en, sistemas de ventanas, puertas, paredes y estructuras de techo, en el rango de 0,1 a 10 conductancia W/m^2K . El tamaño máximo de los elementos de prueba que pueden tener cabida es de 2,4m x 2,4m x 0,15m. La temperatura del aire frío de la caja se puede ajustar entre -20°C y 20°C, y la temperatura del aire caliente de la caja hasta un máximo de 35°C. El mínimo de la temperatura de la cajas calientes está limitada por el requisito de que el protector de la pared exterior deberá ser de aproximadamente 3°C por encima de la temperatura del aire de laboratorio, que se lleva a cabo generalmente a $18,5°C \pm 1°C$.

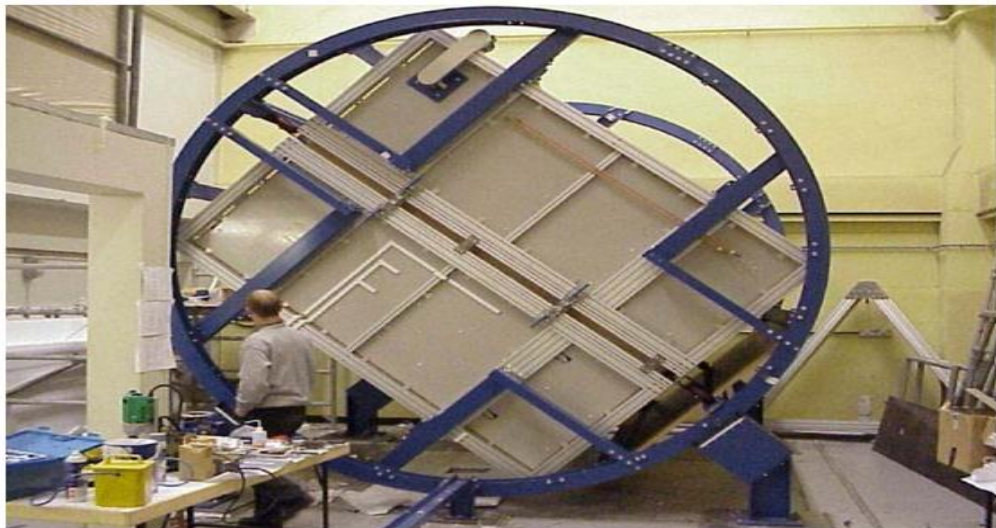
Este aparato ha sido diseñado de manera que puede girar completamente, permitiendo que la muestra se posicione en cualquier orientación, la caja fría horizontal posicionado por encima de la caja caliente, a través de la posición vertical, o inversamente.

²³ Jorge Rose, MSc. Civ.Eng., PhD. (2004): Validating numerical calculations against guarded hot box measurements. Artículo elaborado por el Departamento de construcciones y energía de la TUD.



Fuente: NPL

Figura 1. 13. Diagrama esquemático del aparato y los sistemas de control asociados



Fuente: NPL

Figura 1. 14. Fotografía caja caliente rotable con guarda NPL

El sistema calefactor de pared protector comprende grandes auto-adhesivas almohadillas de silicona, fijados de manera uniforme a la superficie de cada una de las placas de 6mm de espesor de aluminio que componen el protector de la pared externa.

El control de la temperatura de alta precisión se logra mediante el uso de un termistor **embebido** en la placa posterior superior, conectado a un circuito de puente como el sistema de sensor de temperatura. La zona inferior se controla con relación a la zona superior mediante el uso de un termopar diferencial entre las placas traseras superior e inferior.

Las paredes de la caja en caliente se han alineado con un propósito construido al calor del medidor de flujo (HFM), para medir el flujo de calor a través de ellos con una alta sensibilidad y precisión. Este HFM consta de una matriz uniforme de uniones de termopar diferenciales anclados a los discos finos de cobre unidos a las caras opuestas de seis 2m x 1m x 0,02m paneles de tablero rígido aislante.

El sistema de calentador de borde protector se compone de cuatro conjuntos de calentadores de placa, que forman un marco alrededor del borde de la muestra completa. Se hacen de 0,5mm de espesor, utilizando una placa de acero inoxidable contra el cual la muestra o su panel de soporte descansa. Un calentador de tira, pegada a la cara posterior de la placa de acero inoxidable cerca del borde más cercano de la caja caliente, se utiliza en conjunción con un termopar diferencial para elevar la temperatura del borde a la de la cara del panel de muestra o apoyo. El borde opuesto de esta placa de acero inoxidable se sujeta firmemente a una aleta de cobre-enfriamiento, que sobresale 75mm en la caja fría. Los termopares conectados a los puntos medios de las placas de acero inoxidable permiten a sus temperaturas medias a ser monitoreados.²⁴

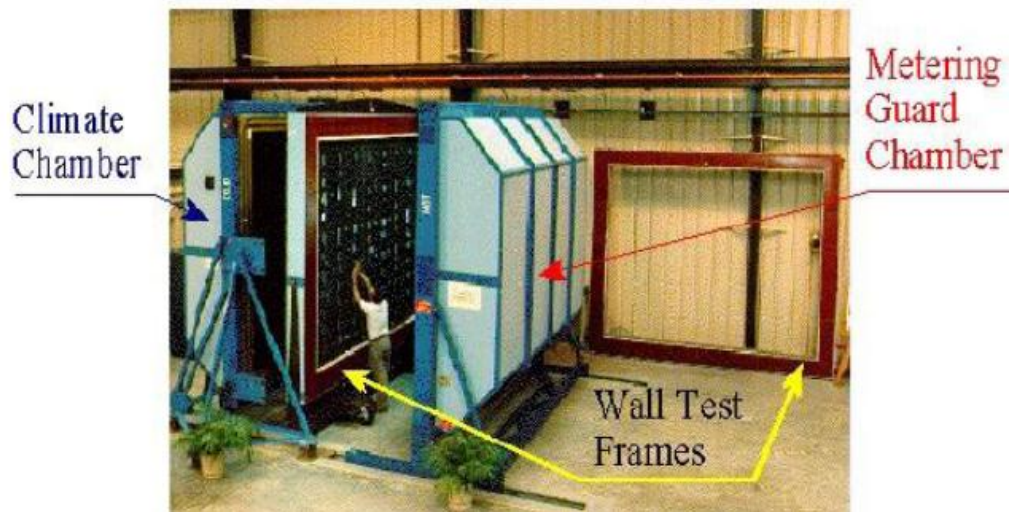
1.6.1.5. “Caja caliente rotatable con guarda (Ornl, Usa)”

El Laboratorio Nacional de Oak Ridge (ORNL) opera y mantiene una Caja Caliente con Guarda para medir la Conductancia Térmica (Valor-R) y la Transmitancia Térmica (Coeficiente Global “U”) de paredes y sistemas de fenestración, Ventanas, tragaluces,

²⁴Ray Williams; Graham Ballar (2003): *Validation of the NPL rotatable wall guarded hot box with horizontal heat flow*. Junio, Public ado Del NPL del Reino Unido.

entre otros montajes que involucran el uso de aislamiento Térmico, teniendo en cuenta que los sistemas de fenestración son aquellos que conforman la superficie externa de las edificaciones (como puertas, ventanas ,cortinas de aire, etc.) y tienen la función de permitir el paso de personas, aire, luz o automóviles. La Caja Caliente rotatable con Guarda (RHGB) tiene la característica de evaluar la muestra verticalmente, horizontalmente y cualquier ángulo entre estos dos. La caja caliente cumple con los requisitos de la norma ASTM C1363 (Para evaluar Paredes y Techos), además cumple con las especificaciones de la ASTM C1199 (Ventanas, puertas y Tragaluces), esta última norma es utilizada por el Consejo Nacional de Fenestración para validar y certificar el rango de valores de los coeficientes globales de Transferencia de Calor. Actualmente a la Instalación se le están haciendo unas serie de modificaciones para cumplir con las especificaciones de los métodos de ensayo establecidos en la ISO 8990 (Paredes y techos) y la ISO 12567 (Ventanas, Puertas y Tragaluces).

Durante la última década se han ensayado más de 200 configuraciones en la Caja Caliente con Guarda Rotable, estas fueron evaluadas de acuerdo con las especificaciones establecidas en la ASTM C236, método que precede a la ASTM C1363. La muestra se coloca en un marco (Frame) que está montado en una base móvil. El marco tiene una apertura de 4x3m y como todas las muestras ensayadas son más pequeñas que esta apertura, el espacio restante se rellena con un aislamiento de alta resistencia térmica y del mismo espesor de la muestra a ensayar. El marco y la muestra que se desea ensayar se colocan entre dos cámaras de igual sección transversal, al marco, las temperaturas de estas cámaras se controlan independientemente, estas cámaras se conocen como lado Frío (Climate Chamber) y Lado Caliente (Metering/Guard Chamber).



Fuente: ORNL

Figura 1. 15. Componentes de la Caja Caliente Rotable con Guarda (ORNL)

En el lado Frío, se coloca un deflector a aproximadamente 250mm de la muestra a ensayar, se cuenta con un sistema de refrigeración que opera continuamente circulando aire frío desde y hasta el sistema de refrigeración a través de unos ductos flexibles aislados conectados a la parte trasera del lado frío detrás del deflector. Cinco blowers centrífugos que se encuentran en el lado frío detrás del deflector impulsan el aire hacia un banco de resistencias eléctricas y luego a través del espacio entre el deflector y la muestra. El aire fluye paralelo a la muestra ensayada, para obtener la temperatura del aire deseada se controla la temperatura del aire que ingresa al lado frío y ajustando la temperatura de las resistencias calentadoras. La velocidad del aire se controla mediante el ajuste de la frecuencia eléctrica de alimentación de los blowers. Cinco anemómetros miden continuamente la velocidad del viento en el espacio entre la muestra y el deflector. La cual varía de 1.3 a 6.7m/s.

En el centro del Lado Caliente, la cámara de medición se presiona contra la muestra, esta cámara es de aproximadamente 2.3mx2.3mx0.4m de profundidad, las paredes son construidas con poliestireno extruido de aproximadamente 76mm con una resistencia térmica de aproximadamente 2.6m²K/W a 24°C. Las paredes internas y externas de la caja o cámara de medición son reforzadas con marcos de aluminio y están interconectadas con varillas roscadas. En el borde en el que hacen contacto la cámara de medición y la muestra se coloca una junta elástica de neopreno para minimizar o evitar

cualquier fuga de aire desde la cámara medición hacia el Lado Caliente. También se coloca un deflector aproximadamente 150mm del borde de contacto entre la muestra y la cámara de medición, detrás de este deflector ahí cuatro resistencias eléctricas y seis blowers, estos componentes se colocan de tal forma que el aire se extrae de la parte detrás del deflector y se impulsa o es forzado a pasar a través de las resistencias eléctricas y luego por el espacio entre el deflector y la muestra. La esquina superior e inferior trasera de la cámara de medición están dobladas, en forma de arco, para reducir el golpeteo o la generación de corrientes turbulentas y proveer una suave transición hacia el espacio frente al deflector. Cuatro anemómetros miden continuamente la velocidad del aire en el espacio, la cual varía de 0 a 0.45m/s.



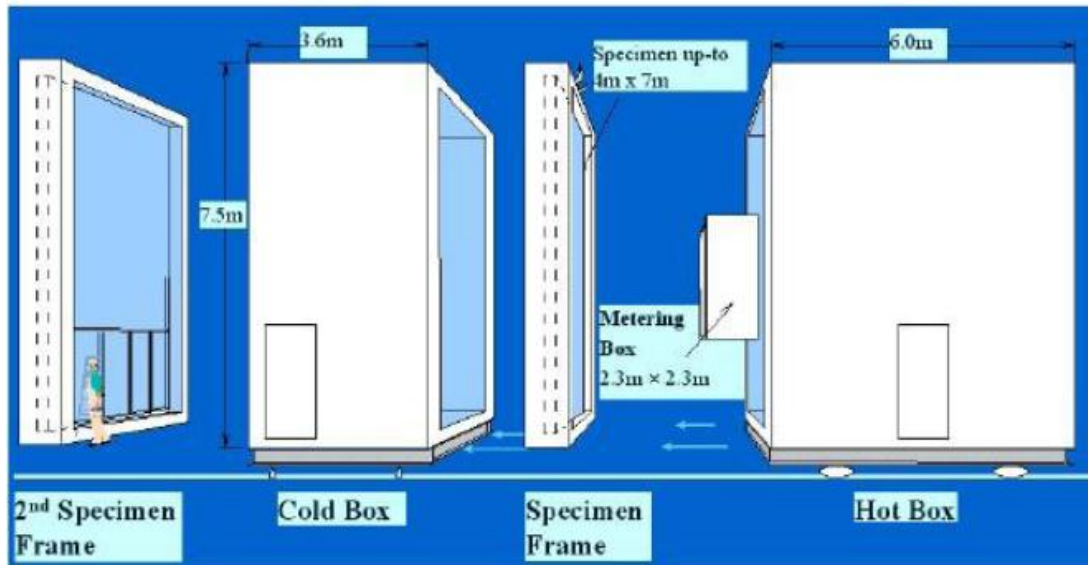
Fuente: ORNL

Figura 1. 16. Caja Caliente Rotable con Guarda (ORNL)

1.6.1.6. “Cámara ambiental (Bcee, Canadá)”

La Cámara Ambiental del Departamento de Construcción, Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Concordia en Quebec – Canadá, es una instalación de pruebas multipropósito para evaluar el rendimiento de sistemas completos de envolventes de Edificaciones o Grandes sistemas de Aislamiento Térmico. La cámara ambiental es una

Instalación tipo Caja Caliente y está conformada por un lado frío en el que se simula el invierno canadiense, un lado caliente en el que se simula las condiciones interiores y una cámara de medición para la medición del flujo de calor de acuerdo con la norma ASTM C236 (Predecesora de la ASTM C1363). Se pueden evaluar muestras de 7m x 4m en cualquiera de los dos marcos centrales que tiene la instalación.



Fuente: BCEE

Figura 1. 17. Componentes de la Cámara Ambiental (BCEE)

La Instalación cuenta con un puente grúa puede mover el marco alrededor del laboratorio y hacia el lado frío, mientras que el lado caliente se desliza sobre cuatro canales hacia el marco y el lado frío. Las paredes del lado frío y caliente están aisladas con 0.18m de espuma rígida de poliuretano, en el interior están recubierto con una lámina de acero inoxidable y en el exterior con una de aluminio cada una de estas tiene un espesor de 1mm.

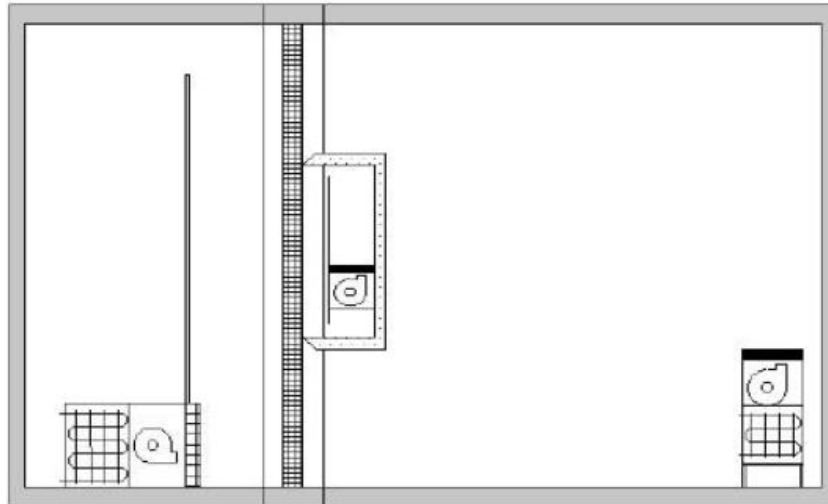
Los sistemas mecánicos y de control disponible proporcionan una amplia gama de condiciones de ensayo requeridas. El lado frío tiene un evaporador de enfriamiento principal para las pruebas a baja temperatura y una unidad de refrigeración que proporciona temperaturas por debajo de cero, se utiliza un calentador de 25kW para controlar la temperatura. La unidad de refrigeración es un compresor de tornillo de 5 Toneladas de capacidad a -40°C, este compresor puede operar entre el 25% y el 100%

de su capacidad permitiendo que el enfriamiento sea ajustable y el cambio de temperatura sea rápido. El calentador es regulado por un SCR (Controlador Rectificado de Silicio) y puede proporcionar un calentamiento continuo brindando 0 a 100% de su capacidad.

En el lado Caliente un sistema de refrigeración de 2 toneladas, un calentador eléctrico de 20kW (regulado con un SCR) y un humidificador proveen las condiciones requeridas en el ambiente interior (local, cuarto, recámara). Esta también cuenta con un pequeño ventilador y calentador. Para el control de la temperatura se regulan los calentadores mediante los SCR y de esta forma se establece el estado estable o el perfil de temperatura deseado. El sistema de adquisición de datos también es un mecanismo de control para establecer proveer las condiciones requeridas. Para mantener los niveles de humedad se enciende y se apaga el humidificador. La estabilidad de la temperatura durante el estado estable es de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ y la de la humedad se encuentra alrededor de $\pm 1.0\%$.

La instalación se diseñó para evaluar los sistemas de aislamiento térmico de dos formas la primera es con la muestra en el marco y entre el lado frío y caliente y la otra es con la muestra ubicada en toda la cámara (Cámara Climática).

Muestra en el Marco: En este modo la muestra necesariamente no debe ocupar todo el espacio del marco, la muestra puede ser más pequeña y el espacio restante se puede rellenar con aislamiento rígido de propiedades conocidas, se pueden colocar diferentes tipos de muestras pequeñas y evaluarlas simultáneamente con el fin de efectuar comparaciones en cuanto al desempeño de las distintas configuraciones.



Fuente: BCEE

Figura 1. 18. Modo Muestra en el Marco con Cámara de Medición (BCEE)

Cuando se utiliza la cámara de medición se pueden medir resistencias térmicas promedios de la muestra en distintas posiciones o alturas. Cuando no se utiliza la cámara de medición el equipo que mide la temperatura superficial de la muestra es una cámara termográfica.

Cámara Climática: Este modo ofrece mayor flexibilidad en la configuración de las muestras, en el recinto cerrado se puede reproducir cualquier clima de invierno a verano. En este modo se dispone de un espacio de 20ft de largo, 13.6ft de ancho y 23.5ft de alto, se puede simular cualquier perfil de temperatura entre -40 y 50°C y se puede regular la humedad relativa hasta un 95%. En el futuro se desea incluir un simulador de lluvia para este tipo de operación.



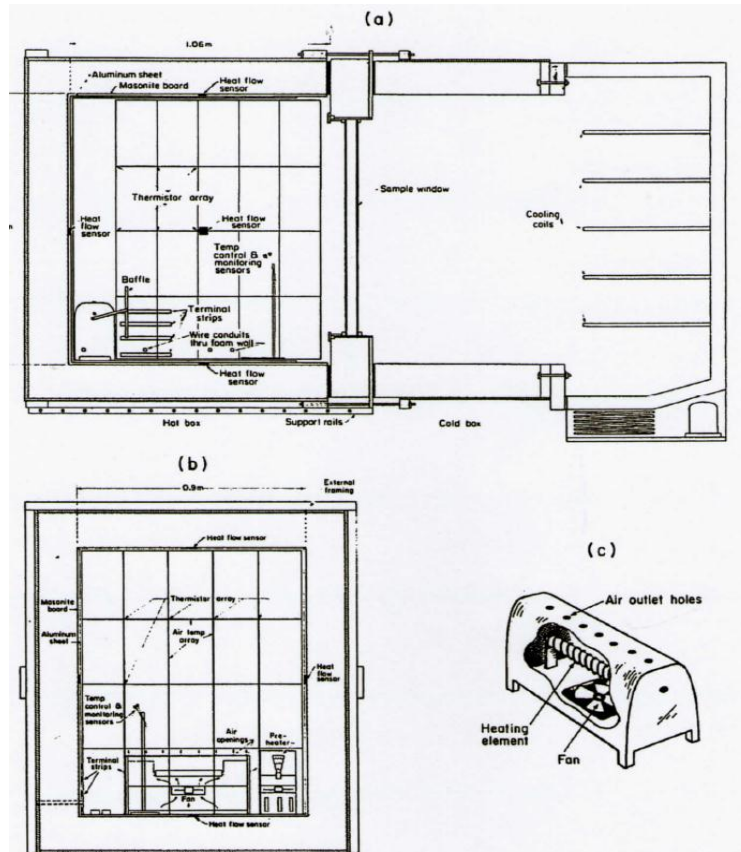
Fuente: BCEE

Figura 1. 19. Cámara Climática (BCEE)

1.6.1.7. Una caja caliente calibrada para la prueba de sistemas de ventana, construcción, calibración y mediciones en prototipo de ventanas de alto rendimiento. “A calibrated hotbox for Testing Window system-construction, calibration and measurements on prototype high-performance windows”

Estructura: La instalación de la caja caliente se muestra en la **Fig. 1.24**. Se compone de dos cajas de 15 cm (6") de aislamiento de espuma rígida de poliuretano con una pared de madera exterior. La parte trasera de la caja fría consiste en una unidad de refrigeración capaz de mantener la caja en 255°K con una precisión de 0.5°K. La caja caliente contiene un calentador eléctrico que se dosifica con precisión. Las superficies interiores de la caja caliente están cubiertas con lámina de aluminio (2 mm de espesor) para asegurar temperaturas uniformes de la pared. Los interiores de ambas cajas están pintados de negro. Un deflector impide la transferencia de radiación entre el calentador eléctrico y el espécimen de ensayo. La ventana bajo prueba está montada en un marco de ensayo especialmente construido que consiste principalmente de aislamiento de

espuma de poliuretano. Revestimientos de madera contrachapada necesarios para la rigidez, se montan en el lado de la caja fría del marco.



Fuente: Article "A calibrated hotbox for testing window system-construction, calibration and measurements"

Figura 1. 20. Vistas de la caja caliente

La instalación normalmente opera con la caja caliente aproximadamente a la temperatura de la habitación circundante (295°K) y la caja fría por debajo de la temperatura ambiente (típicamente 255°K). La transferencia de calor es principalmente de la caja caliente a la caja fría. La cantidad de energía aplicada al calentador y el ventilador con el fin de mantener la caja caliente a temperatura constante da el flujo de calor a través de la muestra después de una pequeña corrección de conducción a través del marco de ensayo y las pérdidas a través de la pared.

Un controlador de temperatura SCR proporcional ajusta la potencia del calentador para mantener la estabilidad de temperatura excelente dentro de la caja caliente; las

temperaturas en un solo lugar varían típicamente en menos de $0,05^{\circ}\text{K}$. Utilizan un medidor de vatios-hora especialmente construido que, directa multiplica las formas de onda de voltaje y corriente y por tanto es insensible a la forma de onda y el ángulo de fase. Se tiene una precisión mejor de un 1%.

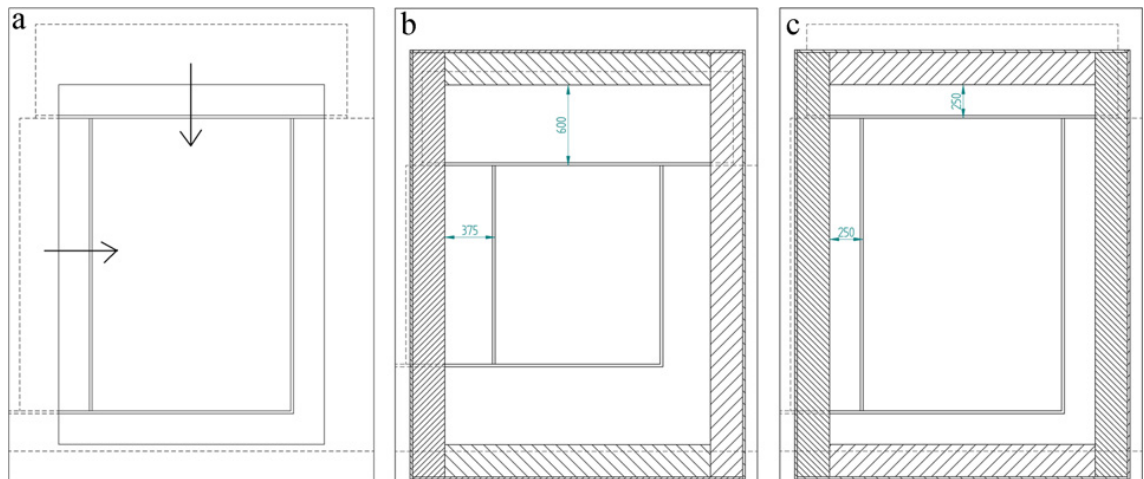
1.7.1.8. Caja caliente de la Universidad de Perugia (Italia)"Mediciones de transmitancia térmica con el método de la caja caliente: Calibración, procedimientos experimentales y análisis de incertidumbre de tres enfoques diferentes"

El diseño de la caja caliente producido en el Departamento de Industrial Ingeniería de la Universidad de Perugia se basó en los tres estándares para la calibración de cajas calientes: la Europea EN ISO 8990, la americana ASTM C1363-05, y el GOST ruso 26.602,1-99.

El área de medición de las muestras puede ser igual o menor que 2.3m^2 , y las dimensiones de las muestras posibles a evaluar son de 1.230m 1.480m . La superficie global incluye el área proyectada de la ventana, incluyendo el marco. Estas dimensiones obviamente influyen en el diseño del aparato y, en particular, las dimensiones del panel que alberga la muestra (panel de soporte). La distancia mínima entre el la muestra y el borde del panel es, de acuerdo con el estándar, 0.200 m , y el espesor mínimo del panel es de 0.100 m . El panel de soporte fue diseñado para ser flexible y capaz de albergar muestras estándar de puertas y de ventanas. Se compone principalmente de un marco rígido de cuatro partes, que son móviles para permitir el fácil montaje de las muestras y la adecuación en los diferentes tamaños de estas (ver figura 1.25), en la figura 1.26 se ilustra la configuración del equipo y los respectivos materiales de construcción de cada pieza.

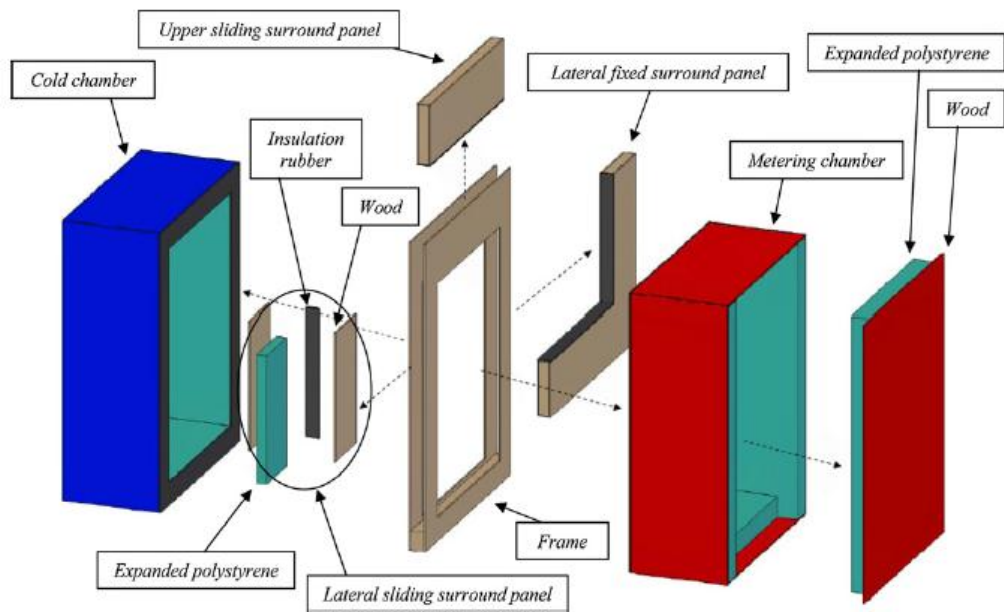
El panel de soporte es una estructura tipo sándwich compuesto por dos paneles de madera (0.019m cada uno) con una capa intermedia de poliestireno expandido (0.240 m). El panel de soporte separa las dos habitaciones del aparato de cajas calientes, la

cámara de caliente y fría, tienen las mismas dimensiones: 2.700m de alto; 2.000mlargo; y 0.900m de ancho. La altura y la longitud se determinaron por las dimensiones del panel de soporte. La anchura se determinó como resultado de un compromiso entre las necesidades para crear un clima uniforme de las dos habitaciones y tener espacio suficiente para albergar todas las instrumentaciones y sondas. Las paredes de las dos salas están hechas de los mismos materiales del panel de soporte. La conductividad térmica de la ampliación poliestireno es 0.034W/mK, y la transmitancia térmica de las paredes es 0.134W/m² K.



Fuente: Artículo "Mediciones de transmitancia térmica con el método de la caja caliente: Calibración, procedimientos experimentales y análisis de incertidumbre de tres enfoques diferentes"

Figura 1. 21. (a, b, c). Panel central de muestras, diferentes configuraciones.



Fuente: Artículo "Mediciones de transmitancia térmica con el método de la caja caliente: Calibración, procedimientos experimentales y análisis de incertidumbre de tres enfoques diferentes"

Figura 1. 22.Despiece y configuración de la caja caliente Perugia.

Durante las pruebas, las temperaturas individuales dentro de las dos habitaciones se mantienen constantes gracias a un sistema de calefacción para el lado caliente y un sistema de refrigeración para el lado frío. El sistema de calefacción es hecho de 50 metros de alambre en forma de S dispuesto dentro de la cámara (fig. 1.27). La potencia de calentamiento del alambre es de 50 W. Debido a un sistema de control PID, el alambre puede encender y apagar automáticamente. Es posible mantenerla temperatura interna de la habitación caliente a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una tolerancia inferior a $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El lado frío está equipado sistema de refrigeración con un compresor colocado en la parte superior de las habitaciones. El evaporador del refrigerado está hecho de tubos de cobre y aletas de aluminio, y es equipado con un ventilador y una válvula termostática, para enfriar directamente el aire dentro de la habitación. Las temperaturas de funcionamiento de la sala de frío varían de -10 a $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por esta razón, la sala de frío también está equipada con un alambre de la calefacción con el fin de volver a la temperatura deseada si la habitación se enfría demasiado. Un cuadro con una vista general del aparato se muestra en la figura. 1.28.



Fuente: Artículo "Mediciones de transmitancia térmica con el método de la caja caliente: Calibración, procedimientos experimentales y análisis de incertidumbre de tres enfoques diferentes"

Figura 1. 23. Sistema de calefacción lado caliente



Fuente: Artículo "Mediciones de transmitancia térmica con el método de la caja caliente: Calibración, procedimientos experimentales y análisis de incertidumbre de tres enfoques diferentes"

Figura 1. 24. Vista general del aparato de caja caliente

Para las mediciones de temperatura, se seleccionaron termopares tipo T hechos de un cobre unión (+) y constantano (-). La temperatura rango es de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, la sensibilidad es $48,2\text{ }^{\circ}\text{V} / ^{\circ}\text{C}$. 142; Los termopares se instalaron dentro de las cámaras caliente y fría, también se utilizaron 69 termopares diferenciales para evaluar las diferencias de temperatura entre la cámara de dosificación y el ambiente externo.

Para medir el flujo de calor se utiliza un contador de energía que mide el consumo de electricidad (J) y, dividiendo este valor por el tiempo, se obtiene el flujo de calor por unidad de tiempo. Por otro lado, ya que la norma rusa recomienda el uso de medidores de flujo de calor, también se utilizaron 12 sensores de flujo de calor (tipo termopila pasiva) que fueron instalados en el lado de medición de la caja caliente. Dos sensores de velocidad de aire (uno para cada cámara) para completar la instrumentación.

Todos los datos adquiridos se transfieren a un PC, con la opción de seleccionar el paso de tiempo de las adquisiciones, sino que también es posible visualizar y guardar los datos adquiridos.

El aparato también alberga dos pantallas de radiación (deflectores) colocados en las dos cámaras entre la fuente de calefacción / refrigeración y el apoyo panel. La norma requiere que la emisividad de las pantallas tiene que ser superior a 0,80. Paneles de madera de álamo con un valor de emisividad de alrededor de 0,90 fueron elegidos. Dos ventiladores, uno en cada cámara, ayudan a evitar la estratificación térmica.²⁵

1.6.2. Cuadros comparativos de cajas calientes

Teniendo en cuenta la información más relevante encontrada en las anteriores cajas caliente se construyeron una serie de tablas de las características de algunas de estas, para en un capítulo posterior plantear un rediseño conceptual de la instalación de Caja caliente de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

²⁵F. Asdrubali*, G. Baldinelli (2010): Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches. *Enero 2011 Publicado por Universidad de Perugia*.

Tabla 1. 3. Cuadro comparativo de cajas calientes
CUADRO COMPARATIVO DE CAJAS CALIENTES (Parte a)

CARACTERISTICAS	TNO HOLANDA	BRANZ NUEVA ZELANDA	TUD DINAMARCA	NPL INGLATERRA	ORLN USA	BCEE CANADA	PERUGIA ITALIA
Tipo de caja.	Caja caliente con guarda	Caja caliente calibrada	Caja caliente con guarda	Caja caliente con guarda	Caja caliente con guarda	Caja caliente calibrada.	Caja caliente calibrada.
Material del aislamiento LC.	EPS	Espuma Rígida	No disponible	Almohadillas de Silicona	No disponible	Espuma rígida de poliuretano.	EPS
Espesor del aislamiento LC	200 mm	100 mm	No disponible	No disponible	No disponible	0.18 X mts.	0.24 X mts.
Material que recubre el aislamiento LC.	Madera contrachapada	No disponible	No disponible	Aluminio	No disponible	Recubierto interior de acero inoxidable y exterior de aluminio cada uno con 1 mm de espesor.	Madera con espesor de 0,019 mts
Material del aislamiento LF.	EPS	Espuma rígida	No disponible	No disponible	No disponible	Espuma rida de poliuretano	EPS
Espesor del aislamiento LF.	200 mm	100mm	No disponible	Almohadillas de Silicona	No disponible	0.18 X mts.	0.24 X mts.
Material que recubre el aislamiento LF.	Madera contrachapada	No disponible	No disponible	Aluminio	No disponible	Recubierto interior de acero inoxidable y exterior de aluminio cada uno con 1 mm de espesor.	Madera con espesor de 0,019 mts
Dimensiones LC.	Ancho 3.20 X Altura 3.75 X Prof. 1.25 X mts	Ancho 2.4 X Altura 2.4 X Profundidad 1.2 X mts	No disponible	No disponible	Ancho 4 X Alto 3 X mts	Altura 7.5 X Prof. 6 X mts.	Alto 2.7 X Largo 2.0 X 0.90 de ancho mts

CUADRO COMPARATIVO DE CAJAS CALIENTES (Parte b)

Material del aislamiento del marco de soporte	No disponible	No disponible	No disponible	EPS	No disponible	No disponible.	EPS
Espesor del aislamiento del marco de soporte	No disponible	Espuma rígida	No disponible	150 mm-60mm-20mm	No disponible	No disponible.	0.24 X mts.
Material que recubre el aislamiento del marco de soporte	No disponible	No disponible	No disponible	No disponible	No disponible	No disponible.	Madera con espesor de 0,019 mts
Dimensiones del marco de soporte	1.25 X 1.50 X mts	No disponible	No disponible	No disponible	4 X 3 X mts	No disponible.	Alto 2.7 X Largo 2.0
Espesores de muestras posibles a evaluar	60 mm	No disponible	100mm -13mm-9mm	150 mm-60mm-20mm	No disponible	No disponible.	No disponible.
Área de Medición	4.5 mts.mts de cada lado	1.2 m X 1.2 m	1.2 X 1.8 X mts	2.4 X 2.4 X mts	No disponible	2.3 X 2.3 mts	No disponible.
Dimensiones de la caja de guarda.	Ancho 1.97 X Altura 2.22 X Prof. 0.61 X mts	No disponible	No disponible	No disponible	2.3 X 2.3 X 0.4 X mts con paredes de poliestireno extruido de 76 mm,	No disponible.	No disponible.
Rotable/Fija	Rotable	No disponible	No disponible	Rotable	Rotable	Fija	Fija

CUADRO COMPARATIVO DE CAJAS CALIENTES (Parte c)

Características del sistema de control de temperatura	Control de temperatura con un 900 CPE controlador digital.	No disponible	Un regulador PID, utilizado en la cajade guarda para controlar el medio de esta, igual que en la caja ambiente(caliente.)	Un termistor embebido en la placa posterior superior, conectado a un circuito de puente como el sistema de sensor de temperatura. Se usa un termopar para controlar las diferencias de temperaturas de la parte superior e inferior.	Se controlan con resistencias para ajustar la temperatura del aire	No disponible.	Sistema PID
Características del sistema de suministro de aire frio	No disponible	No disponible	No disponible	No disponible	Se utilizan ductos flexibles conectados a la parte trasera de la cámara, blowers centrífugos detrás del deflector impulsan el aire hacia unos bancos de resistencias.	Evaporador de enfriamiento principal, para temperaturas bajas, y una unidad de refrigeración para temperaturas bajo cero, más calentador de 25 Kw para controlar la temperatura. .	Evaporador de enfriamiento principal, para temperaturas bajas, y una unidad de refrigeración para temperaturas bajo cero, más calentador de 25 Kw para controlar la temperatura. .
Características del sistema de generación de calor, potencia de las resistencias, cantidad y ubicación, mecanismo de soporte	3 Bombillos de potencia máxima de 200 W.	No disponible	No disponible	No disponible	No disponible	Sistema de Refrigeración de dos toneladas más un calentador eléctrico de 20 KW , el calentador es regulado por un controlador rectificad de silicio, también posee un humidificador y un pequeño ventilador.	50 metros de alambre en forma de S, con una potencia de 50 W

Elementos para suministro de aire: tipo, cantidad, potencia y características de los ventiladores empleados	2 Ventiladores con ajustador de frecuencia. Con un deflector con emisividad de 0,95.	Ventiladores mas deflectores		No disponible	5 blowers centrífugos, la velocidad de estos se ajusta mediante la frecuencia eléctrica de suministro a estos, también posee 5 anemómetros que miden la velocidad del aire entre la muestra y el deflector.	No disponible.	Ventiladores del lado frio y caliente, deflectores.
Instrumentación utilizada.	<ul style="list-style-type: none"> • 9 de sensores de temperatura de aire de tipo T, LC y LF. 	Se utilizan 16 pares de termopares de tipo T.		No disponible	Se coloca un deflector a 150 mm de contacto entre la muestra y la cámara, detrás del deflector 4 resistencias y 6 blowers. Las esquinas superior e inferior de la caja están dobladas en forma de arco para reducir fenómenos de turbulencia.	No disponible.	Termopares Tipo T para la medicion de temperatura superficial, y termopila pasiva para el flujode calor a demas de sensores de velocidad del aire.

CAPÍTULO 2

2.1. ASPECTOS GENERALES DE LA NORMA ASTM C1363

2.1.1. ALCANCE

La mencionada norma establece los principios para el diseño de un aparato de caja caliente y los requisitos mínimos para la determinación del rendimiento térmico estable de materiales o estructuras de construcción cuando se expone a condiciones de laboratorio controladas, simulando las condiciones reales. Este método también se utiliza para medir el rendimiento térmico de un material de construcción en las condiciones de las pruebas estandarizadas, tales como las requeridas en las especificaciones de material C 739 C 764, C 1224 y la Práctica C 1373.

Este método de prueba se utiliza para grandes muestras homogéneas o no homogénea. De igual forma se aplica a estructuras de edificios o conjuntos compuestos de materiales de construcción para los que es posible construir un espécimen representativo que se adapta el aparato de prueba. Las dimensiones de las proyecciones de muestras o rebajes están controladas por el diseño del aparato de caja caliente. Algunas cajas calientes están limitadas a los especímenes planas o casi plana. Sin embargo, las grandes cajas calientes se han utilizado para caracterizar claraboyas salientes y las secciones del ático.

2.1.2. FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de un aparato de caja caliente requiere un número significativo de las mediciones fundamentales de temperaturas, zonas y de potencia. El equipo destinado a estas mediciones requiere calibración para asegurar que los datos son exactos. Durante la instalación inicial y las pruebas de verificación periódica, cada sistema de medición y el sensor está calibrado contra un estándar trazable a un laboratorio nacional de normalización. Si el aparato de caja caliente ha sido diseñado, construido y operado en la forma ideal, sin calibración o

ajuste aún más sería necesario. Como tal, la caja caliente se considera un método primario y la incertidumbre del resultado se analizó por valoración directa de las incertidumbres de medición de componentes de la instrumentación empleada en la fabricación de las mediciones.

En una prueba ideal de la caja caliente a un material homogéneo que no hay diferencia de temperatura ya sea en el espécimen caliente o frío se enfrenta a conducir un flujo de calor flanqueo. Además, no habría diferencias de temperatura que conducen el calor a través del límite de las paredes de la cámara de medición. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que mantener una perfecta protección / medición del balance de la cámara no es posible y pequeñas correcciones son necesarias para caracterizar con precisión todas las rutas de flujo de calor desde la cámara de medición. Para obtener esta confianza final en el resultado de la prueba, es necesario comparar el resultado global del aparato de caja caliente mediante la realización de mediciones en muestras con valores conocidos de transferencia de calor y comparando los resultados con los valores esperados.

Este método de ensayo no especifica todos los detalles necesarios para el funcionamiento del aparato. Las decisiones sobre el muestreo de materiales, selección de las muestras, acondicionamiento previo, el montaje de la muestra y el posicionamiento, la elección de las condiciones de ensayo, y la evaluación de los datos de prueba se ajustará a los métodos de prueba aplicables ASTM, guías, prácticas o especificaciones de producto o regulaciones gubernamentales. Si no existe norma aplicable, criterios de ingeniería de sonido que refleja los principios aceptados de transferencia de calor debe ser utilizado y documentado.

2.1.3. CONDICIONES PARA LAS PRUEBAS

- La probeta seleccionada para la prueba, con la esperanza de que va a presentar el mismo comportamiento térmico de la estructura que pertenece, debe pertenecer al área más representativa de esta.

- El panel de sonido envolvente, o panel central de muestras, debe ser una estructura uniforme que tiene propiedades térmicas estables. El material deberá tener una conductividad térmica baja y homogénea que tanto soporta la muestra de ensayo y proporciona un patrón uniforme y reproducible flujo de calor que atraviesa la muestra evitando las pérdidas a través de los bordes del perímetro.
- El tamaño de la caja en su conjunto tendrá las dimensiones necesarias para que coincida con el tipo de muestras previstas para la prueba. Para la construcción de conjuntos, se tendrá en cuenta las secciones representativas.

Materiales utilizados en la construcción del aparato de caja caliente deberá tener una alta resistencia térmica, baja capacidad calorífica y de aire de alta resistencia. Como resistencia. Poliestireno u otros materiales de espuma de células cerradas se han utilizado ya que combinan tanto alta resistividad térmica, buenas propiedades mecánicas, y facilidad de fabricación.

La instrumentación deberá ser capaz de control y medición de la temperatura del aire y la velocidad y rodea temperaturas de la superficie con el fin de mantener la temperatura deseada superficie de coeficiente de transferencia.

La instrumentación o sensores deben contar con un mínimo de cinco pares de termopares diferenciales por m² de área. Las uniones de termopar se encuentran justo enfrente de la otra y, preferiblemente, situado en los centros de las áreas aproximadamente iguales. Los pares de termopares están conectados en serie para formar una termopila en el que las tensiones individuales se suman para dar una salida única o leer de forma individual en los casos en que pueden producirse diferencias significativas o se espera que en los niveles de flujo local de calor.

Las salidas de los transductores de temperatura se miden por separado o como un grupo. Si se miden por separado, las medidas de las superficies serán diferentes por lo que sus calibraciones, a niveles de flujo de energía típica de uso, pueden ser revisadas periódicamente.

Las paredes de la cámara climática deberán estar bien aisladas para reducir la capacidad de refrigeración requerida y para evitar la formación de condensación en el exterior de las paredes de la cámara.

Calentadores, ventiladores y serpentines de refrigeración deberá estar protegido o colocado detrás de un deflector de aire para mantener la uniformidad de las temperaturas de la superficie que irradian a la superficie de la muestra.

2.1.4. PROCEDIMIENTO RECOMENDADO

1. Coloque el marco de ensayo, con la muestra a evaluar instalada, en la apertura entre las cámaras climáticas caliente y fría.
2. Realice todas las conexiones eléctricas necesarias y comprobar el sistema de adquisición de datos para la continuidad de la medida.
3. Sellado por completo el sistema de caja caliente en preparación para la prueba.
4. Encender los sistemas de acondicionamiento de inicio y los controles de ajuste de temperatura a los puntos de ajuste apropiados para producir las condiciones de temperatura deseadas.
5. Empezar a escanear los datos de adquisición de los aparatos de ensayo y continuar la operación hasta que las condiciones estabilizados.
6. Después de que las condiciones de las pruebas finales que se alcanzan temperaturas estables, se realizaran repetidas series de adquisición de datos. Estos conjuntos se obtiene en un intervalo de tiempo igual al conjunto de datos de la hora aproximada constante, pero no menos de 30 minutos
7. El resultado final, la prueba deberá ser calculado el resultado promedio calculado para los períodos últimos cinco constantes del período de prueba se estabilizó. "

2.1.4.1. Aspectos Importantes

Orientación de la pieza y la dirección de transferencia de calor, caliente y en frío lado a lado la temperatura del aire y las velocidades y la presión diferencial, cuando no se especifica, se elegirán para cumplir los requisitos de la investigación del elemento de construcción, por lo general para que coincida en condiciones de uso.

- Cuando no se indique lo contrario, la velocidad del aire deberá ser el mínimo necesario para lograr la uniformidad de la temperatura deseada en los requisitos, deberá estar en la dirección de la convección natural.
- Algunos ejemplares medidos requieren tiempo suficiente para llegar al equilibrio térmico y de humedad después del montaje. Estos se acondicionará en condiciones de laboratorio durante el tiempo necesario para establecer el equilibrio térmico.

Durante la instalación inicial y la verificación periódica de los ensayos, se calibra cada sistema de medición y sensor contra una norma (trazable) de un laboratorio de normas nacional. Si el equipo de caja caliente se diseñó, construyó y es operado de manera ideal, ningún ajuste y calibración debería ser necesario. Como tal, la caja caliente se considera un método primario y la incertidumbre del resultado se analiza por evaluación directa de las incertidumbres de los componentes de medición de los instrumentos empleados en la toma de mediciones.²⁶

²⁶ Tesis de Grado. Diseño de una instalación para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.2009

CAPÍTULO 3

3. DESCRIPCION DEL EQUIPO UTILIZADO

En este capítulo se describirá de manera detallada todas las características de la caja caliente de la Universidad Tecnológica de Bolívar, en la cual se realizaron las pruebas a los materiales en estudio.

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CAJA CALIENTE UTB

La construcción e instalación de la caja caliente de la UTB fue en base a la ASTM C1363-65 (Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus), en la cual se establecen los lineamientos para la evaluar muestras de estructuras de construcción, como en nuestro caso materiales de construcción naval compuestas principalmente de materiales aislantes.

La instalación cuenta básicamente con una caja de lado frío con su respectiva unidad de refrigeración, una caja de lado caliente con un sistema de calefacción, un panel central de control, y una estructura de base móvil.

- Área de muestras posibles a evaluar 50cms X45cms
- Área real de medición 45cms x 45cms.
- Espesores de muestras evaluables: 1 a 4 ½ pulgadas.
- Tipo de muestras a evaluar: Sistemas de Aislamiento Térmico (Homogéneos, no homogéneos, uniformes, no uniformes).
- Temperatura del aire: Lado Frío 12 a 40°C. Lado Caliente 20 a 40°C.
- Velocidad del aire: Lado Frío 0.2 a 15m/s. Lado Caliente 0.2 a 1.5m/s.
- Capacidad Sistema de Refrigeración: 2 toneladas de refrigeración.
- Capacidad Resistencias Calentadoras: 500W C/U.

La mayoría de consideraciones del diseño de la instalación se hicieron en base a la norma, pero aspectos tales como la capacidad de las resistencias calentadoras se establecieron en base a investigaciones previas, como el caso de las mediciones experimentales realizadas a muestras de los materiales utilizados para el aislamiento térmico de embarcaciones tipo PAFL (Patrulleras de Apoyo Fluvial) de COTECMAR en el cual las muestras al ser sometidas a flujos de calor con fuentes superiores a los 500W, las temperaturas obtenidas eran demasiado altas llegando al punto de inflamación de las muestras por lo cual era necesario extraer calor para el control de las temperaturas, siendo esta la causa por la cual se decidió establecer esta potencia. También las mediciones experimentales realizadas en la nodriza fluvial número 7 en el marco del proyecto OEB nos dieron el rango de temperaturas superficiales a las que realmente están expuestos los sistemas de aislamiento térmico.

3.2. LADO CALIENTE

Es el lugar donde se genera el flujo de calor, este posee una resistencia calentadora de 500 W, la configuración del lado caliente hace posible que la transmisión de calor a través de la muestra se realice mediante el sistema de transmisión de calor por convección.

Básicamente el sistema calefactor está integrado por el panel o carcasa de lado caliente, ductos de aire, la resistencia eléctrica, el marco refractario de la resistencia y el ventilador.

3.2.1. Panel o Carcasa del lado caliente

La estructura del panel está construida de láminas de acero A-36 de 3/16 (4,7625mm de espesor), con un agujero cuadrado en su interior a través del cual pasara el sistema de aire caliente o el de transmisión de calor por contacto. En la parte hueca de la estructura entre la carcasa del lado caliente se inyecta poliuretano para minimizar las pérdidas de calor entre el ambiente y el área de ensayo.

En la parte posterior del panel se instalaron pequeñas láminas de acero las cuales se usaron para la unión por remaches con la lámina exterior de soporte, la cual tiene una cavidad exterior que permite la entrada del cableado de los sensores y de la alimentación eléctrica para la resistencia y el ventilador, en las **figuras 3.1** y **figuras 3.2** Observamos que la carcasa del lado caliente posee soportes en dos lados opuestos con el fin de ajustar el marco que soporta las muestras a ambos lados de la caja, también se observa que en la parte inferior se instalaron un sistema de ruedas lo cual le brinda movilidad al panel en la estructura que la soporta.

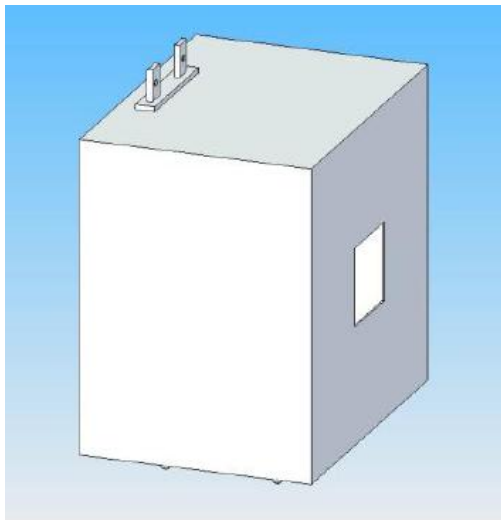


Figura 3. 1. Carcasa Lado caliente

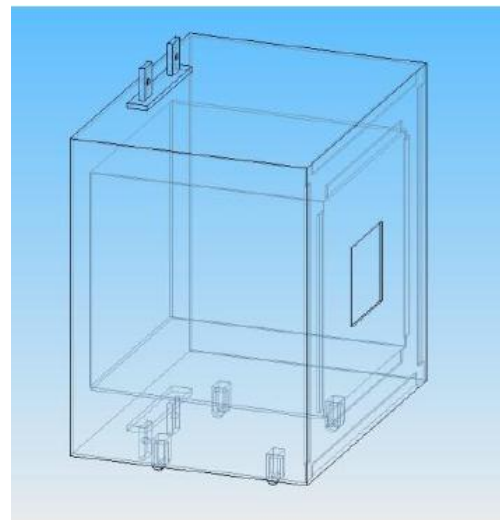


Figura 3. 2. Vista Interior Carcasa lado caliente

3.2.2. Ductos de Aire caliente

Este fue construido de acero A-36 de 3/16" de espesor, al interior de este se encuentra un ventilador, la resistencia, el marco de la resistencia y otra serie de accesorios como el deflector y las láminas que soportan al ventilador y la resistencia. Este componente se encuentra adentro de la carcasa del lado caliente y hasta hacer contacto con la lámina trasera de la carcasa, como se puede observar en la **figura 3.12**, **figura 3.13** y **figura 3.14** esta cuenta con un ducto a través del cual se extraerá el cableado de los sensores y los de alimentación de la resistencia y el ventilador.

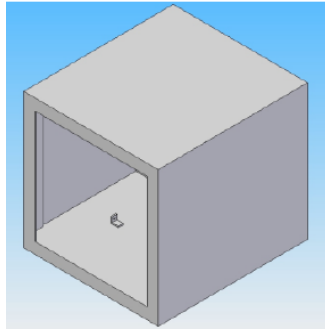


Figura 3. 3. Ducto de aire

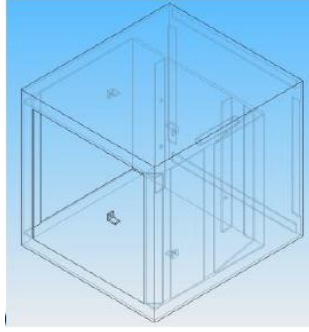


Figura 3. 4. Ducto de aire con bordes visibles

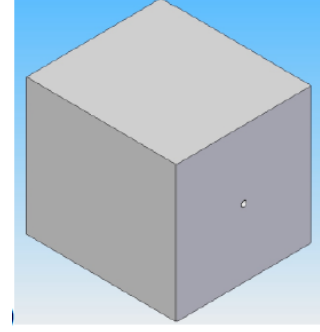


Figura 3. 5. Ducto de aire 90°

3.2.3. Resistencia eléctrica

La resistencia que hace parte al sistema de transferencia por convección forzada es una resistencia tubular plana con una potencia de 500 W alimentada con una tensión de 110VA. La resistencia es de 22X22 cms y 3/16” de espesor, esta no está recubierta por ningún tipo de lámina para que así pase el aire impulsado por el ventilador.

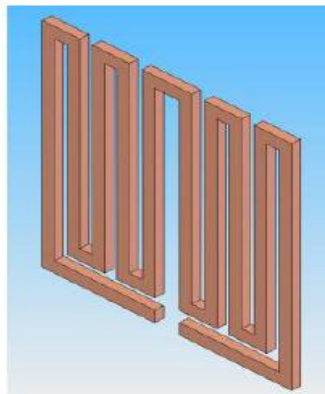


Figura 3. 6. Resistencia tubular plana

3.2.4. Marco de la Resistencia

El marco de la resistencia es una estructura hueca inyectada con material refractario fundido para disminuir pérdidas de calor logrando que gran parte del calor generado

por la resistencia pase a través de la muestra debido a la circulación del aire, este marco posee una serie de orificios para ajustarse a los ductos de aire caliente. La resistencia se encuentra insertada en el canal o hendidura que tiene el marco, anulando así cualquier movimiento de la resistencia.

3.2.5. Ventilador

El ventilador impulsa el aire a un flujo con el cual se llega al rango de velocidades permisibles de 0 a 8 m/s permisibles o requeridos cuando el aire circula frente a la muestra ensayada, el ventilador es uno de tipo axial HXM-200 (SOLER Y PALAU), con un mínimo consumo de energía, soporta temperaturas medias de aproximadamente 40 °C y trabaja a una velocidad de 1660 RPM, con una tensión de 110VA.



Figura 3. 7. Ventilador

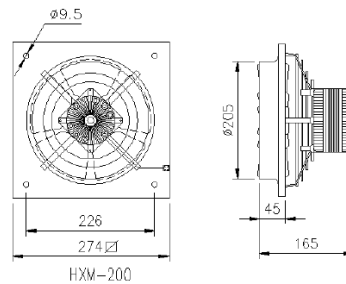


Figura 3. 8. Plano del ventilador

3.2.6. Accesorios

Son una serie de láminas que sirven como soporte al ventilador y la resistencia, y una que cumple la función de deflector la cual guía la circulación de aire frente a la muestra de tal forma que el aire se mueve perpendicularmente a la sección transversal de la muestra.

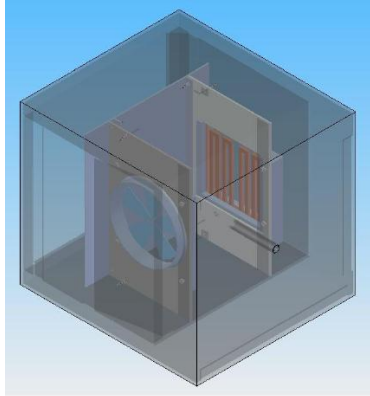


Figura 3. 9. Isométrico del sistema de transferencia de calor por convección

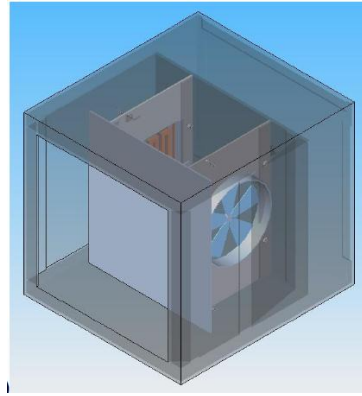


Figura 3. 10. Isométrico 90° del sistema de transferencia de calor por convección

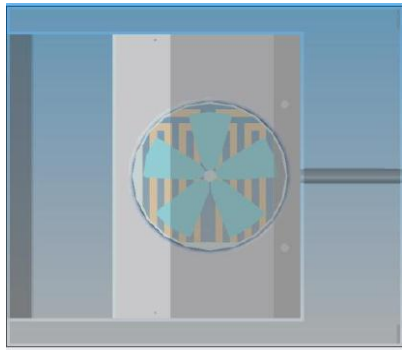


Figura 3. 11. Lateral del sistema de transferencia de calor por convección

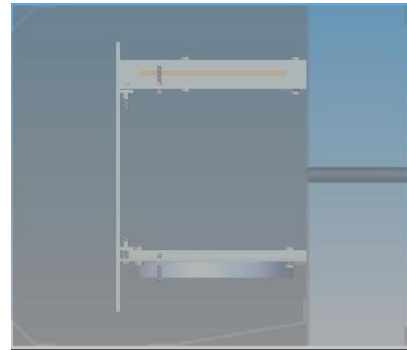


Figura 3. 12. Superior del sistema de transferencia de calor por convección

3.3. LADO FRÍO

Es el lugar de la caja caliente donde se refrigera la muestra o se extrae el calor que pasa a través de esta proveniente del lado caliente, el lado frío está constituido de un sistema de distribución de aire o ductos y un panel o carcasa contenedor de los ductos, el aire frío es producido por una unidad de refrigeración de 2 toneladas, y una unidad manejadora en la cual podemos regular las revoluciones del ventilador y así controlar la velocidad del aire para así poder evaluar las muestras a diferentes velocidades, simulando de la mejor manera las condiciones reales.

3.3.1. Carcasa del lado frío

Esta carcasa fue construida de láminas de acero A-36 de 3/16" de espesor con dos orificios por los cuales atraviesan los ductos de distribución de aire y también el deflector de aire, este panel o carcasa tiene una serie de accesorios los cuales impiden la movilidad de los ductos de ensayo. Al igual que el panel del lado caliente la estructura en su interior fue inyectada con aislamiento de poliuretano para evitar la transferencia de calor entre el área de medición y el ambiente.

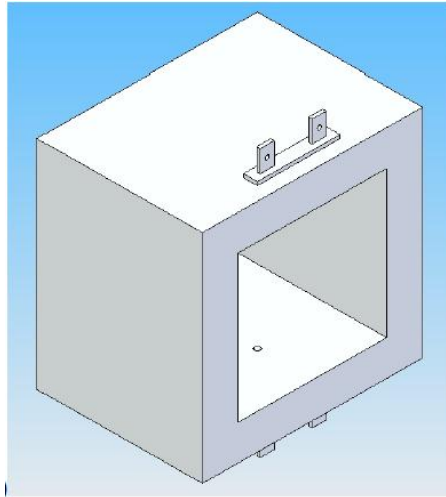
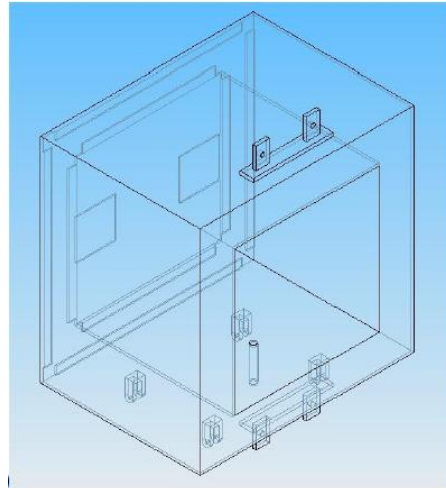


Figura 3. 13. Carcasa lado frío



**Figura 3. 14. Carcasa lado frío
bordes visibles y ocultos**

3.3.2. Ductos lado frío

El sistema de distribución de aire fue construido de láminas de acero A-36 de 3/16" de espesor. En las **figuras** de la **3.17** a la **3.30** se ilustran los planos y vistas de los componentes que integran el sistema.

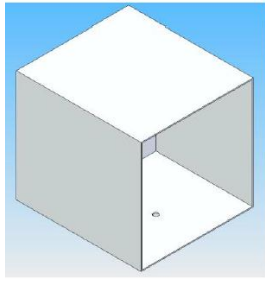


Figura 3. 15. Carcasa lado frío

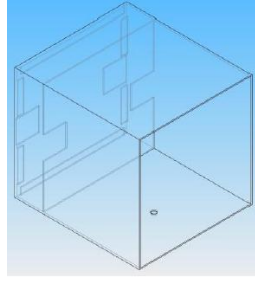


Figura 3. 16. Carcasa lado frío bordes ocultos

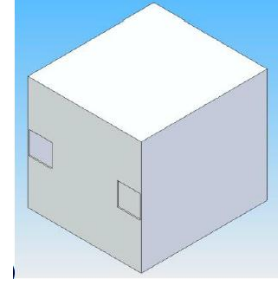


Figura 3. 17. Carcasa lado frío Vista 90°

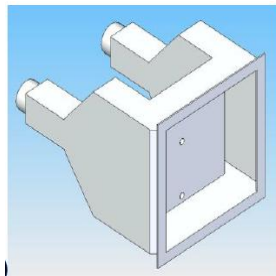


Figura 3. 18. Conductos de aire

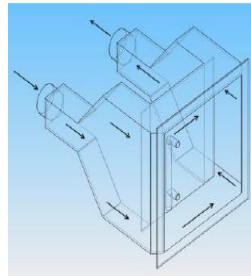


Figura 3. 19. Conductos de aire bordes ocultos

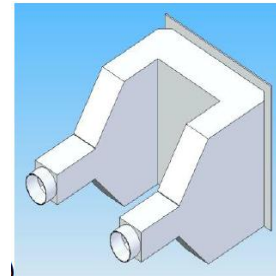


Figura 3. 20. Conductos de aire vista 90°

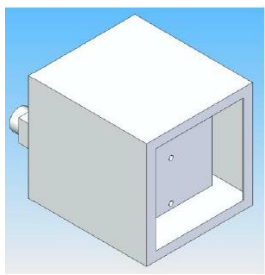


Figura 3. 21. Isométrico lado frío

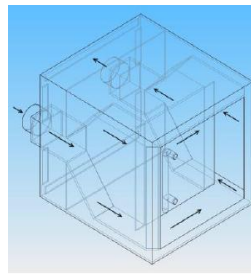


Figura 3. 22. Isométrico lado frío con bordes ocultos

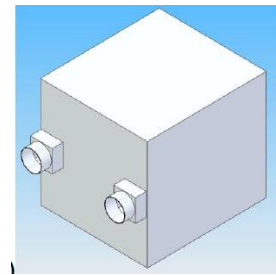


Figura 3. 23. Isométrico lado frío vista trasera.

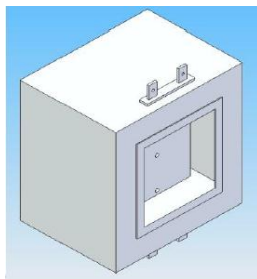


Figura 3. 24. Configuración lado frío

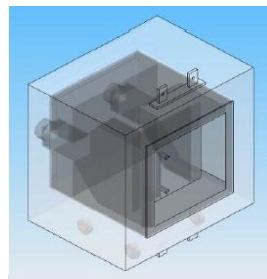


Figura 3. 25. Configuración lado frío bordes cultos

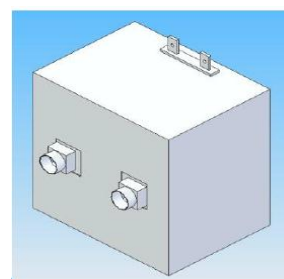


Figura 3. 26. Configuración lado frío vista 90°

El flujo de aire que se suministra por la unidad de manejo de aire sale a una temperatura aproximada de 12°C y 50% de humedad relativa, lo cual resulta una temperatura muy baja con respecto a la temperatura de confort aproximada de 26 °C, para esto la maquina cuenta con una resistencia tubular plana calentadora de 6000W la cual se encuentra en los ductos que vienen desde la unidad manejadora.

3.4. PANEL CENTRAL O DE MUESTRAS

Es el marco donde se montan las muestras para realizar las pruebas, está construido por láminas de acer A-36 de 3/16 de espesor, en su interior se encuentran el espacio vacío donde van las muestras con una medida exacta de 45X50 cms. ya que no debe haber juego entre las muestras y el marco, la instalación cuenta con 4 marcos de diferentes espesores los cuales permiten evaluar muestras de 1, 2, 3 y 4 pulgadas, en el interior del panel al igual que en los dos lados de la caja caliente se inyectó poliuretano por las razones explicadas anteriormente.

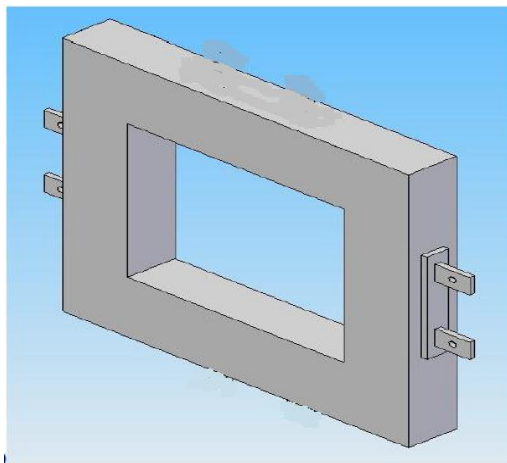


Figura 3. 27. Panel de muestras de 110 mm

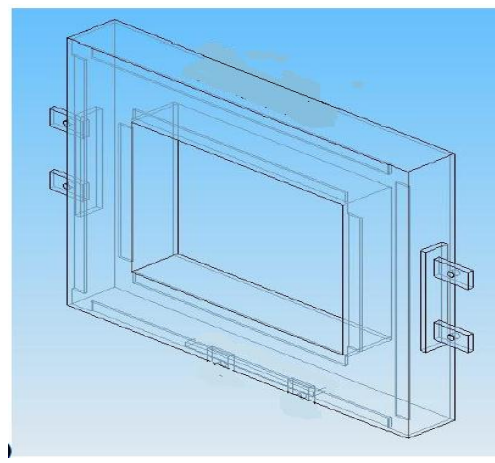


Figura 3. 28. Panel de muestras de 110 mm bordes ocultos

3.5. BASE MÓVIL

Esta estructura está construida por laminas un perfil de acero estructural en L de 50X50X3 mm, esta funciona como base de apoyo a la caja caliente y todos sus componentes, además cuenta con un sistema de ruedas que la cual permite que el lado caliente como el lado frio de la caja puedan moverse sobre los rieles que la base posee con el fin de instalar cómodamente el instrumentado a las muestras que se encuentren sobre el panel de muestras.

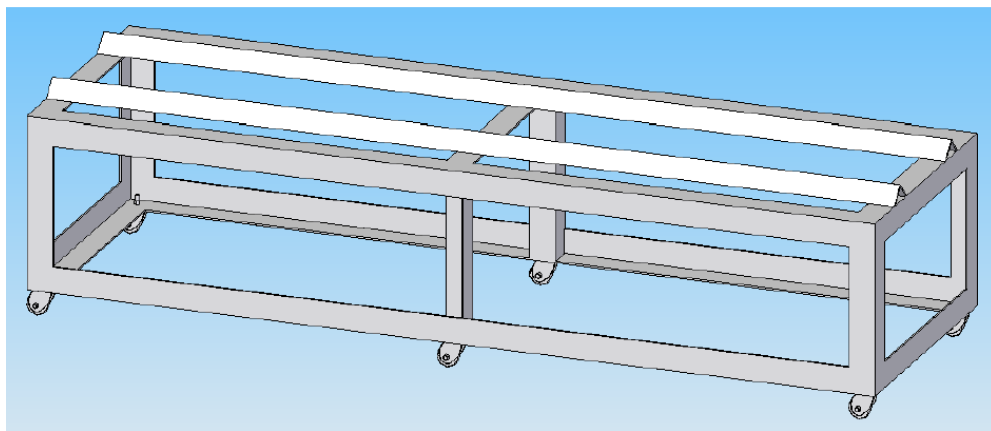


Figura 3. 29. Base móvil

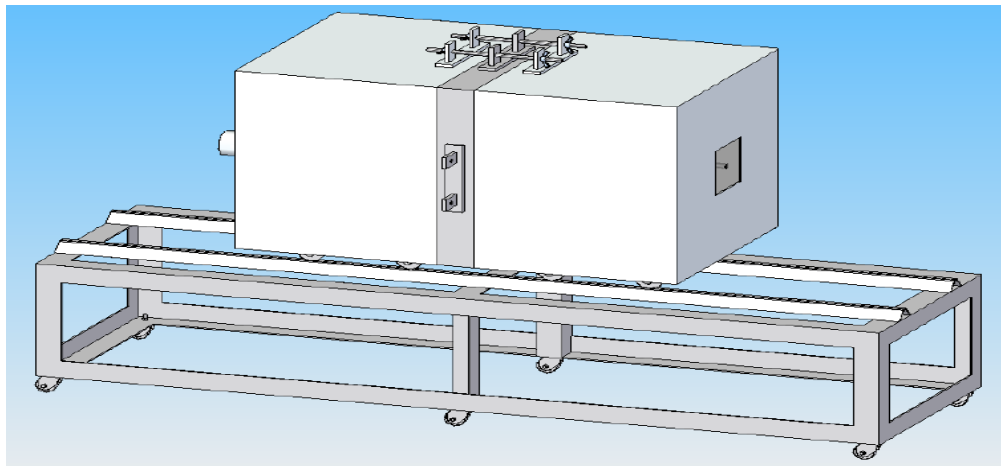


Figura 3. 30. Caja caliente de la UTB

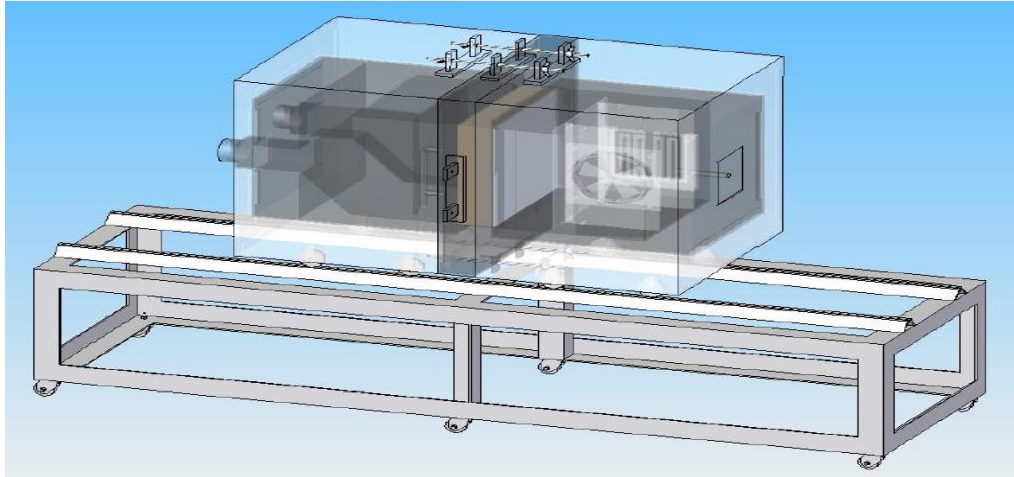


Figura 3. 31. Caja caliente de la UTB, Vista interior

Nota: En la caja caliente UTB los soportes que unen el panel del lado frío, el panel de lado caliente y el panel de muestras, se encuentra realmente en los laterales izquierdos y derecho de la instalación.

3.6. SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN

Para el estudio de las propiedades térmicas de los materiales es necesario una toma y registro de datos, la instalación cuenta con los siguientes elementos para esta función:

- Sensores de temperatura superficial (Siete de cada lado).
- Sensores de flujo de calor (Seis de cada lado).
- Sensores de velocidad del aire frío (Dos sensores).
- Sensores de velocidad del aire caliente (Dos sensores).
- Sensores de temperatura del deflector (Dos de cada lado).
- Transductor de potencia para la resistencia calentadora.
- Dimmers para regular la potencia del ventilador y la potencia de la unidad manejadora.

Los sensores son ubicados de forma estratégica en diferentes puntos como se ilustra en la **figura 3.32**.

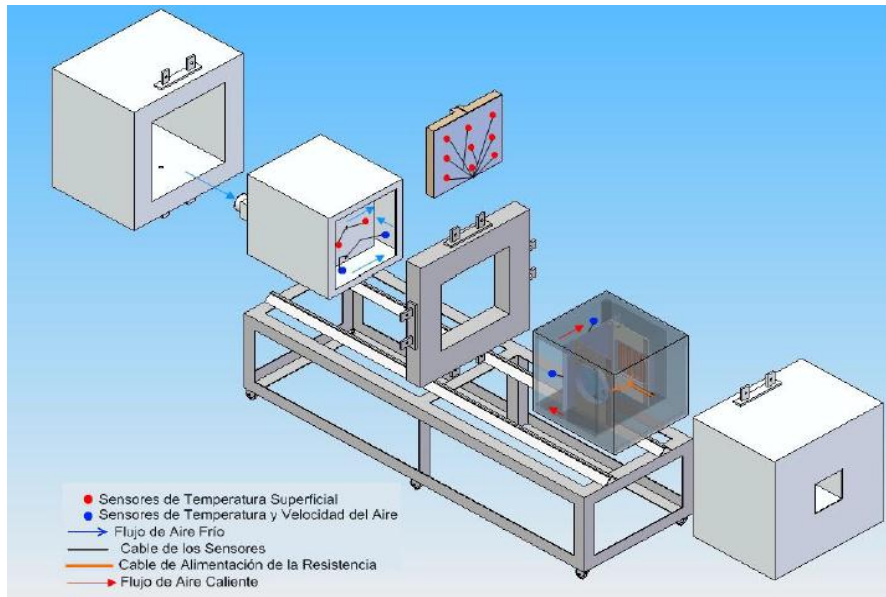


Figura 3. 32. Distribución de los sensores de velocidad y temperatura

Esquema De Ubicación De Los Sensores E Instrumentación de las muestras De Prueba

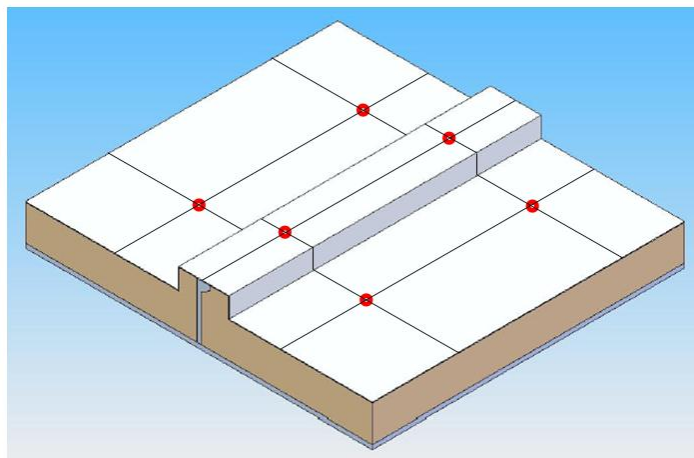


Figura 3. 33. Muestra de prueba con bulbo HP 80 x 6 y ubicación se sensores de flujo de calor

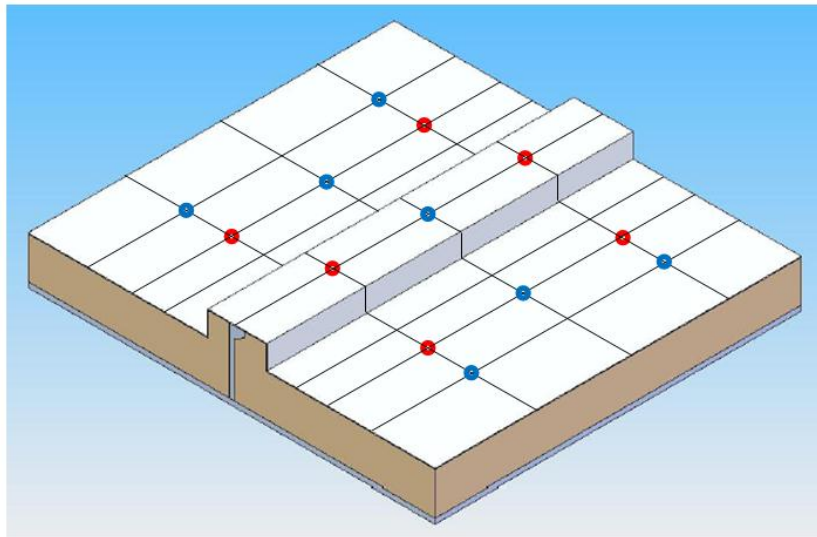


Figura 3. 34.Muestra de prueba con bulbo HP 80 x 6 y ubicación se sensores de flujo de calor y temperatura superficial

● Sensores de Flujo de calor

● Sensores de temperatura superficial

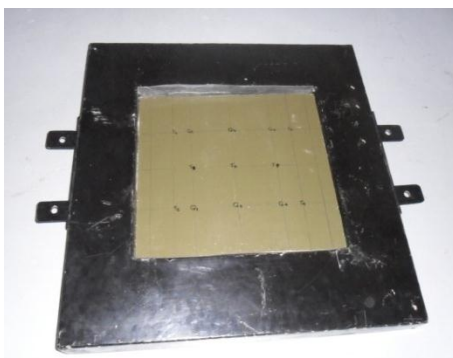


Figura 3. 35. Fotografía Muestra ubicada en el panel central con grilla de ubicación lado caliente



Figura 3. 36.Fotografía 3.2. Muestra ubicada en el panel central del lado frío

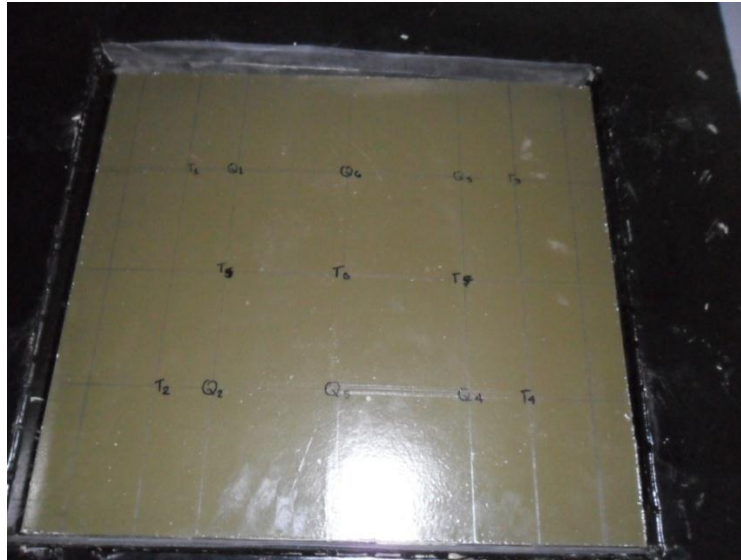


Figura 3. 37.Fotografía Identificación de la posición de sensores de flujo de calor y temperatura superficial sobre la muestra del Lado caliente



Figura 3. 38. Fotografía Instrumentación de una muestra Lado caliente

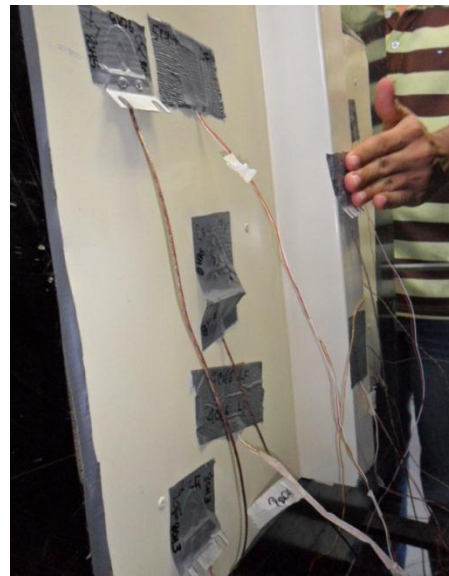


Figura 3. 39.Fotografía Instrumentación de una muestra Lado frío

Los sensores de temperatura y velocidad se encuentran calibrados según los siguientes rangos que maneja la instalación.

Tabla 3. 1. Rangos de operación de la caja

Sensor	Rango de calibración
Temperatura del aire	0-120 °C
Velocidad del aire	0-15 m/s

3.6.1. Sensores

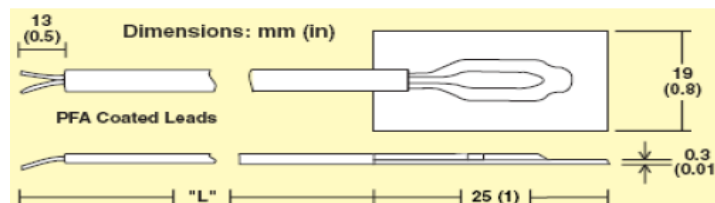
3.6.1.1. Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura seleccionados son termocuplas de rápida respuestas con refuerzo autoadhesivo, serie SA1 (Omega Engineering), cumple con los límites especiales de error (SLE 0 a 1250 °C, 1.1 °C o 0.4%) y la Norma EN 60584-2: Tolerancia clase 1 (-40 a 375 °C ± 1.5 °C Y 375 a 1000°C ± 0.4 °C), con una velocidad de respuesta menor a 0.3 segundos.

Tabla 3. 2. Especificaciones técnicas termocuplas de rápida SA1

Tipo de Termocupla	Tipo K (CHROMEGA®-ALOMEGA®)
Adhesivo	Silicona con base de Cemento
Máxima Temperatura	175°C (350°F)
Mínima Temperatura	-60°C (-75°F)
Dimensiones	25 L x 19 W x 0.3 mm
Recubrimiento	Polímero resistente a altas temperaturas y fibra de Vidrio Reforzada
Cable	30 AWG Recubierto Longitud 3metros -PFA (Perfluoroalkoxy)

Fuente: Omega Engineering.



Fuente: Omega Engineering.

Figura 3. 40. Esquema de la termocuplas de rápida respuesta SA1

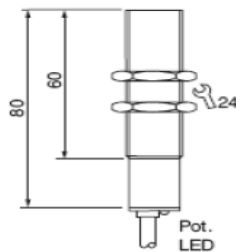


Fuente: Omega Engineering.

Figura 3. 41. Termocuplas de rápida respuesta SA1

3.6.1.2. Sensores de flujo de aire

Son sensores de tipo compacto, LG 518 GA ID#11240 (EGE Elektronik), este tipo de sensores son desmontables ya que tienen rosca externa para su sujeción sobre la superficie del conducto en para ajustar al lugar donde se realizan las mediciones.



Fuente: EGE Elektronik.

Figura 3. 42. Esquema del sensor LG 518 GA



Fuente: EGE Elektronik.

Figura 3. 43. Sensor LG 518 GA

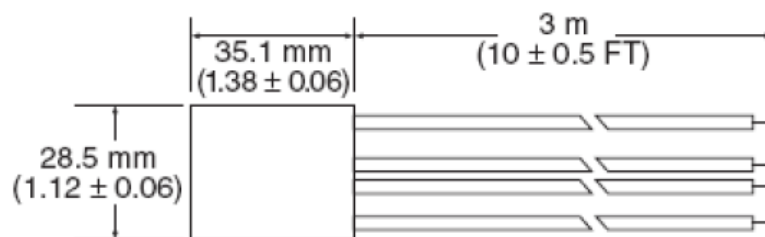
Tabla 3. 3. Especificaciones técnicas Sensor LG 518 GA

Rango de Detección [m/s]	0.5...15.0
Diseño	M18x1
Tipo de Salida	4 a 20 mA
Carga R_L [Ω]	200...500
Voltaje de Alimentación [V]	24 DC \pm 20%
Consumo de Corriente [mA]	70
Temperatura Ambiente [$^{\circ}$C]	-20 a +70
Gradiente de Temperatura [K/min]	200
Tiempo de arranque [s]	20...40
Material del Sensor	PBT/Br-Ni
Protección	IP - 67

Fuente: EGE Elektronik.

3.6.1.3. Sensores de Flujo de calor

Estos sensores son una película delgada, serie HFS-3 (Omega Engineering), al ser de película delgada este permite una fácil colocación y no ocupa mucho espacio, debido a su configuración es de fácil adaptación a la superficie de la muestra. El sensor se colocó en contacto con la superficie a la que se quiere censar la transferencia de calor. La misma energía o flujo de calor que atraviesa la superficie medida, debe pasar a través del sensor HFS. Cuando esto sucede, se genera un gradiente de temperatura a través de la barrera térmica (Sensor). Este gradiente de temperatura es directamente proporcional a la velocidad de transferencia de calor.



Fuente: Omega Engineering.

Figura 3. 44. Esquema del sensor HFS-3

Tabla 3. 4. Especificaciones técnicas sensor HFS-3

Flujo de Calor Máximo Censado [Btu/ft ² hr]	30000
Temperatura Máxima [°F]	300
Material de la Barrera	Película de Poliamida (Kapton)
Cable	30 AWG Aislado con Teflón (Cod. Color)
Sensividad [μ V/Btu/ft ² hr]	3.0
Tipo de Termocuplas	K
Tiempo de Respuesta [s]	0.2
Capacitancia Térmica [Btu/ft ² °F]	0.01
Resistencia Térmica [°Fft ² hr/Btu]	0.01
Espesor de la Barrera [in]	0.007

Fuente: Omega Engineering.

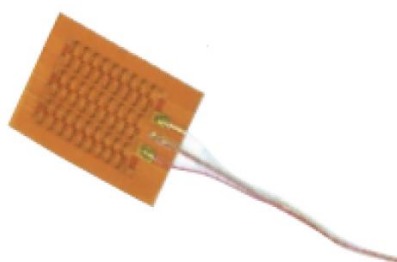


Figura 3. 45.Sensor de flujo de calor de película delgada HFS-3

3.6.2. Hardware de adquisición de datos

El hardware del DAQS consta de una interfaz de comunicación serial y Ethernet (tarjeta de adquisición), en al cual se instalan módulos de entrada y/o salida dependiendo de la aplicación que se quiera realizar. Para este caso específico contamos con 4 módulos para termocuplas (realizan la conversión de voltaje a grados Celsius internamente) y que además permiten tomar los valores de voltaje (por lo cual se pueden utilizar para los sensores de flujo de calor.), además de un módulo de entrada de corriente. No hay módulos de salida, ya que solo se desea hacer adquisición de datos con este sistema. El control se hará con otro sistema independiente. Los sensores adquiridos hasta el momento son termocuplas superficiales marca omega, sensores de flujo de calor marca omega, termocuplas de aire marca instrumatic, sensores de velocidad de flujo de aire marca ege Elektronik. A continuación se muestran imágenes de todo el hardware antes mencionado con algunas especificaciones:

3.6.2.1. NI cFP-1808 Interfaz Ethernet/Serial para NI Compact FieldPoint



Figura 3. 46. NI cFP-1808 Interfaz Ethernet/Serial para NI Compact FieldPoint

- Interfaz de E/S Distribuida para Ethernet o redes RS232
- Fácil de leer y escribir desde un servidor en red usando NI Labview o cualquier cliente OPC
- Hasta 8 módulos Compact FieldPoint por nodo distribuido Ethernet/Serial
- Hardware robusto para entornos industriales -50 g de impacto, 5 g de vibración, -40 a 70 C
- Software FieldPoint para rápido acceso de E/S distribuidas

3.6.2.2. NI cFP-TC-120. Módulo de Entrada de Termopares de 8 Canales para Compact FieldPoint



Figura 3. 47. NI cFP-TC-120. Módulo de Entrada de Termopares de 8 Canales para Compact FieldPoint

- 8 entradas diferenciales
- Resolución de 16 bits, rechazo de ruido de 50/60 Hz

- Operation HotPnP (plug-and-play)
- Mide señales de termopares y mili voltios
- Rango de entrada o tipo de termopar configurable por software (por canal)
- Rango de operación de -40 a 70 °C

3.6.2.3. NI cFP-AI-111. Módulo de Entrada de Corriente Analógica de 16 Canales para Compact FieldPoint

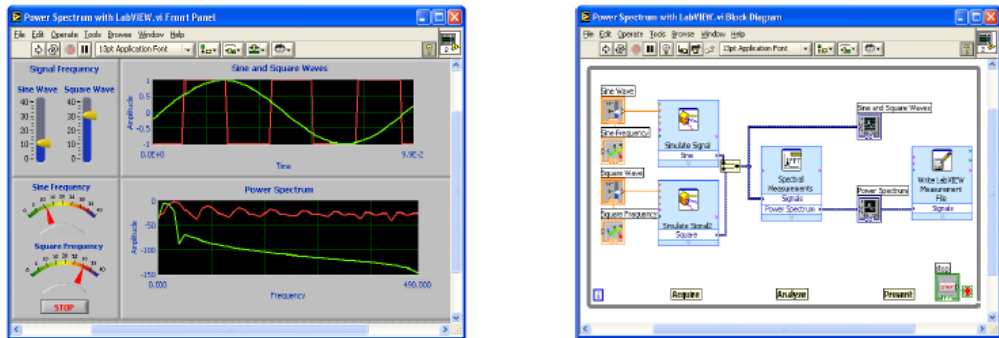


Figura 3. 48. NI cFP-AI-111. Módulo de Entrada de Corriente Analógica de 16 Canales para Compact FieldPoint

- Resolución de 16 bits, rechazo de ruido de 50/60 Hz
- 16 entradas de corriente
- Mide corrientes -- 0 a 20 mA, 4 a 20 mA, ± 20 mA

3.6.3. Software de análisis y visualización

El programa que se utiliza para el tratamiento y visualización de los datos obtenidos por el sistema de adquisición de datos es **LABVIEW**. Labview es un lenguaje de programación gráfica, propiedad National Instrument, lo cual garantiza un interfaz perfecta con el DAQ Hardware. Permite de manera fácil y rápida interconectar sistemas de adquisición de datos NI con el PC y elaborar programas de supervisión, tratamiento y almacenamiento de las variables de un proceso.



Fuente: Labview Software

Figura 3. 49.Interface de Usuario y ventana de Programación

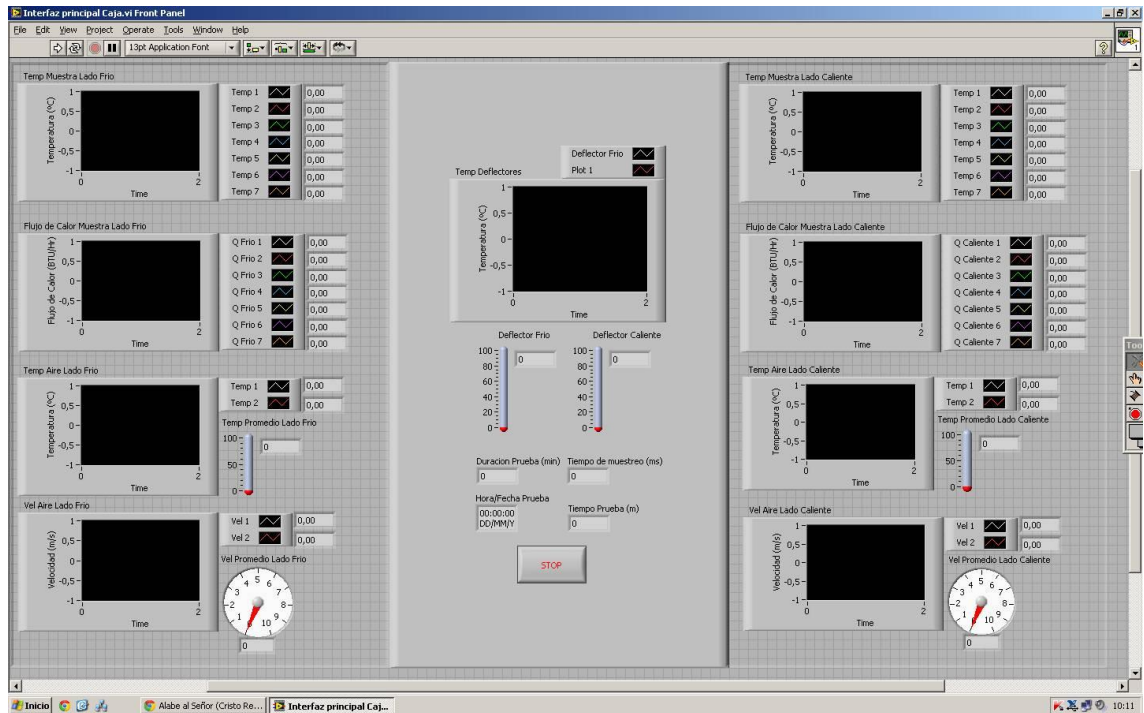


Figura 3. 50. Interfaz de Labview para la caja caliente

3.6.4. Sistema de Control de temperatura y velocidad

La caja caliente consiste en dos cajas o lugares que aportan temperaturas elevadas (lado caliente) a un lado de la muestra y por el otro temperaturas bajas (lado frio) hasta

alcanzar un estado estable buscando así encontrar el coeficiente global de transferencia de calor.

Como la principal y difícil tarea es mantener unas condiciones óptimas de temperatura para realizar la correcta evaluación de la muestra, se hace necesario el uso de un sistema de control para mantener dichas condiciones.

Para generar las condiciones se utilizaran en el lado frío una unidad manejadora de aire de 2 toneladas de refrigeración con una resistencia de 3000 Watts en el suministro del mismo, y del lado caliente una resistencia de 1800 Watts con un ventilador para garantizar que el aire fluya y evitar la estratificación de temperatura. Teniendo en cuenta que la variable crítica es la temperatura, esta es la variable a controlar.

Para el control de dicha variable, se colocaran 2 termocuplas tipo K, una en el lado frío y otra en el lado caliente, que indican el valor de temperatura en sus respectivos PID's (un PID para cada lado) y estos dan la orden a un contactor de encender o apagar las resistencias de cada una de las cajas (caliente y fría), para mantener en un rango de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ la temperatura de ajuste seleccionada para la prueba. Como función adicional se colocaron tarjetas varedoras de frecuencia para poder controlar la velocidad del Blower del Equipo de acondicionamiento de Aire y del Ventilador del lado caliente. A continuación se mostraran imágenes del tablero de control instalado para tal fin.

Como la principal y difícil tarea es mantener unas condiciones óptimas de temperatura para realizar la correcta evaluación de la muestra, se hace necesario el uso de un sistema de control para mantener dichas condiciones.

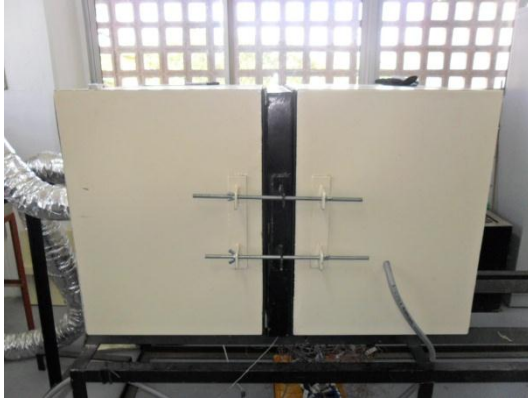


Figura 3. 51.Fotografía acople de las dos cajas (caliente y fría) durante una prueba. El marco donde se ubica la muestra es la parte central de color negro

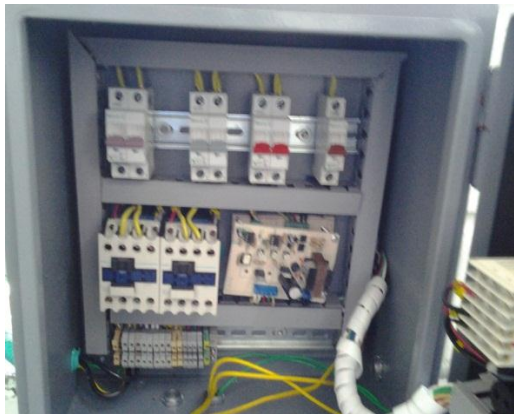


Figura 3. 52.Fotografías Panel de control de la caja caliente

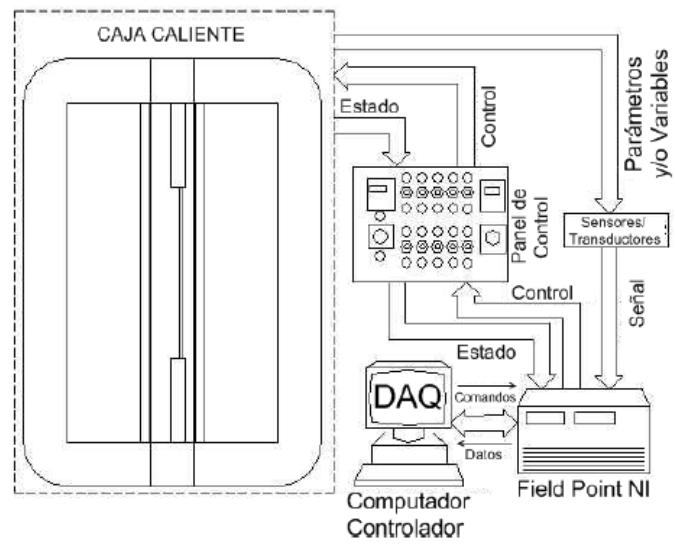


Figura 3. 53. Esquema del sistema de control

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

4.1 EVALUACION EXPERIMENTAL

4.1.1. Procedimiento realizado

Se realizaron corridas experimentales para 3 tipos de envolventes, construidos con Poliuretano, Lana de Roca y Fibra de Vidrio en tres espesores de 25, 50 y 75 mm; empleando intervalos de muestreo de 30 segundos. Normalmente las pruebas fueron realizadas para un periodo de 20 horas para garantizar que las condiciones de temperatura y flujo de calor se estabilizaran tal y como lo recomienda la norma ASTM C1363. La variable tomada como referencia para considerar la estabilización del sistema fue la temperatura superficial de la muestra tanto del lado caliente como del lado frío. Una vez obtenido un comportamiento estable se procedió a realizar los respectivos cálculos de la conductividad o el coeficiente global según se requería. Las fórmulas para el cálculo del mismo fueron las siguientes:

Para la conductividad
$$k = \frac{Q \times \Delta x}{A \times \Delta T} \quad (4.1)$$

Siendo:

Q = El calor medido a través de la muestra con los sensores de flujo de calor

Δx = El espesor de la muestra en evaluación

A = El área efectiva de flujo de calor que corresponde al área de medición de la caja caliente diseñada

ΔT = La diferencia de temperatura superficial de la muestra entre el lado caliente y el lado frío.

Para el cálculo del coeficiente global de calor, se calculó la conductancia térmica según la ecuación ya que los sensores disponibles en la instalación permiten la medición de temperaturas superficiales, más no mediciones de la temperatura ambiente circundante de las muestras necesarias para calcular directamente el coeficiente.

Para el cálculo de la transmitancia térmica de calor se empleó la siguiente ecuación (4.2):

$$\text{Siendo: } C = \frac{Q}{A \times \Delta T} \quad (4.2)$$

Q = El calor medido a través de la muestra con los sensores de flujo de calor ajustados según el factor obtenido con las muestras de poliestireno

A = El área efectiva de flujo de calor que corresponde al área de medición de la caja caliente diseñada

ΔT = La diferencia de temperatura superficial de la muestra entre el lado caliente y el lado frío.

Finalmente se aplica la fórmula para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (Ecuación 4.3)²⁷,

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{C} + \frac{1}{h_o}} \quad (4.3)$$

Donde h_i y h_o son los coeficientes de transferencia de calor sobre las superficies interior y exterior los cuales son determinados por las ecuaciones (4.4 y 4.5.) establecidas por la ASHRAE.

²⁷Tomada de ASHRAE. Fundamentals HandBook Heat Transfer. 2005. Cap. 3

Para superficies planas verticales con velocidades de aire de 5 a 30 m/s, en procesos de transferencia de calor de flujos forzados.

$$h = 7.2V^{0.78} \quad (4.4)$$

Para superficies planas verticales con velocidades de aire menores a 5 m/s, en procesos de transferencia de calor de flujos forzados.

$$h = 5.62 + 3.9 (V) \quad (4.5)$$

4.1.1.1 Análisis de incertidumbre

El análisis de incertidumbre muestra un rango de error (o la región donde se espera que se encuentre el error). Con este análisis es posible determinar la confiabilidad de las pruebas realizadas.

Se realizó el cálculo de la incertidumbre en base a La organización internacional para la estampa y sesión ISO estableció una guía para el análisis de incertidumbre en instrumentos de medición, conocida como “Guía de expresión de incertidumbre en mediciones”, la cual establece las reglas generales para evaluar y expresar el nivel de incertidumbre de un resultado en el cual intervienen varios medidores con diferentes precisiones.

Metodologías de análisis de incertidumbre

La incertidumbre se expresa $X \pm y$ siendo “X” el resultado calculado, mientras “y” representan la desviación estándar estimada. Cuando las exactitudes de los instrumentos utilizados incrementan, “y” disminuye, por tanto incrementa la confiabilidad los foros realizados.

El resultado de la prueba como fusión de las variables medidas se puede expresar como:

$$r = f(X_1, X_2, X_3, \dots X_n)$$

La incertidumbre para resultados se expresa como:

$$\partial r = \left[\left(\frac{\partial r}{\partial X_1} \times \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial X_2} \times \delta x_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial X_3} \times \delta x_3 \right)^2 + \dots \right]^{0.5} +$$

Dónde:

∂r : Incertidumbre del resultado

δx_i : Incertidumbre de las variables medidas X_i

$\delta x_i =$ Coeficiente de sensibilidad absoluta

Es posible utilizar una hoja de cálculo en Microsoft Excel para programar estas expresiones, a continuación se muestra a manera de ejemplo la hoja de cálculo asumiendo que el resultado r es una función del cuatro parámetros X_1, X_2, X_3, X_4 y la fórmula donde intervienen las variables para el cálculo de r en la primera columna de la hoja de cálculo y luego se extiende a los demás columnas, en la primera fila se coloca el valor de las incertidumbres de cada variable, tal como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 4. 1. Primer paso para análisis incertidumbre

	A	B	C	D	E
1		∂X_1	∂X_2	∂X_3	∂X_4
2					
3	X_1	X_1	X_1	X_1	X_1
4	X_2	X_2	X_2	X_2	X_2
5	X_3	X_3	X_3	X_3	X_3
6	X_4	X_4	X_4	X_4	X_4
7					
8	$r = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$	$r = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$	$r = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$	$r = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$	$r = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$

En la celdas correspondientes se coloca el valor de la suma de la variable y la incertidumbre y se recalcula el valor de la función resultado.

Tabla 4. 2. Segundo pasó para análisis de incertidumbre de una medición.

	A	B	C	D	E
1		∂X_1	∂X_2	∂X_3	∂X_4
2					
3	X_1	$\partial X_1 + X_1$	X_1	X_1	X_1
4	X_2	X_2	$\partial X_2 + X_2$	X_2	X_2
5	X_3	X_3	X_3	$\partial X_3 + X_3$	X_3
6	X_4	X_4	X_4	X_4	$\partial X_4 + X_4$
7					
8	$r = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$	$r = f(\partial X_1 + X_1, X_2, X_3, X_4)$	$r = f(X_1, \partial X_2 + X_2, X_3, X_4)$	$r = f(X_1, X_2, \partial X_3 + X_3, X_4)$	$R = f(X_1, X_2, X_3, \partial X_4 + X_4)$

Tabla 4. 3. Tercer paso para análisis de incertidumbre.

	A	B	C	D	E
1		∂X_1	∂X_2	∂X_3	∂X_4
2					
3	X_1	$\partial X_1 + X_1$	X_1	X_1	X_1
4	X_2	X_2	$\partial X_2 + X_2$	X_2	X_2
5	X_3	X_3	X_3	$\partial X_3 + X_3$	X_3
6	X_4	X_4	X_4	X_4	$\partial X_4 + X_4$
7					
8	$r = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$	$r = f(\partial X_1 + X_1, X_2, X_3, X_4)$	$r = f(X_1, \partial X_2 + X_2, X_3, X_4)$	$r = f(X_1, X_2, \partial X_3 + X_3, X_4)$	$R = f(X_1, X_2, X_3, \partial X_4 + X_4)$
9		$\partial(r, X_1)$	$\partial(r, X_2)$	$\partial(r, X_3)$	$\partial(r, X_4)$

En la última fila de esta tabla se obtienen los cuadrados de cada diferencia y en la celda correspondiente (A10), se obtienen la raíz cuadrada de los cuadrados de los términos y de esta forma obtener de incertidumbre total $\partial(r)$:

Tabla 4. 4. Cuarto pasó para análisis de incertidumbre

	A	B	C	D	E
1		∂X_1	∂X_2	∂X_3	∂X_4
2					
3	X_1	$\partial X_1 + X_1$	X_1	X_1	X_1
4	X_2	X_2	$\partial X_2 + X_2$	X_2	X_2
5	X_3	X_3	X_3	$\partial X_3 + X_3$	X_3
6	X_4	X_4	X_4	X_4	$\partial X_4 + X_4$
7					
8	$r = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$	$r = f(\partial X_1 + X_1, X_2, X_3, X_4)$	$r = f(X_1, \partial X_2 + X_2, X_3, X_4)$	$r = f(X_1, X_2, \partial X_3 + X_3, X_4)$	$r = f(X_1, X_2, X_3, \partial X_4 + X_4)$
9		$\partial(r, X_1)$	$\partial(r, X_2)$	$\partial(r, X_3)$	$\partial(r, X_4)$
10	$\partial(r)$	$\partial(r, X_1)^2$	$\partial(r, X_2)^2$	$\partial(r, X_3)^2$	$\partial(r, X_4)^2$

En la siguiente tabla se muestran las incertidumbres de cada uno de los elementos empleados para las mediciones.

Tabla 4. 5. Elementos de incertidumbre

Elemento de incertidumbre	Unidad	Incertidumbre a P= 95%
Longitud	m	± 0.0005
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	± 0.5
Diferencia de temperatura	$^{\circ}\text{C}$	± 0.05
Flujo de calor		± 3.5

Propagación de Incertidumbre en el Factor U o en la conductancia

Cada uno de los elementos de incertidumbre que parece listados en la tabla anterior son incorporados en la incertidumbre total del. La propagación de incertidumbre se basa en el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (Root Sum Square o RSS) explicado anteriormente.

Usando esta metodología se obtienen las incertidumbres de algunos componentes intermedios y la incertidumbre final para factor U o la conductancia. En nuestro caso particular el único componente intermedio es el área de flujo de calor a través de la muestra, éste sólo es requerido cuando no se calculan los factores por unidad de área. Usando el método de la caja caliente indicado en la norma ASTM, el factor U de una Muestra puede ser obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$U_s = \frac{Q_s}{A_s * \delta_{t_{hc}}}$$

Donde $\delta_{t_{hc}} = t_h - t_c$ Representa la diferencia de temperaturas Usando el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados se puede obtener la incertidumbre del factor U o la conductancia tal y como se explicó anteriormente, mediante la expresión

$$\frac{\Delta^p U_s}{U_s} = \sqrt{\left(\frac{\Delta^p Q_s}{Q_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta^p A_s}{A_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta^p \delta_{t_{hc}}}{\delta_{t_{hc}}}\right)^2}$$

4.1.1.2. Calibración de la Caja caliente con Poliestireno Expandido

Inicialmente la conductividad fue medida para 1 muestras de poliestireno expandido (EPS) o icopor con dos corridas de 24 horas a cada una, la muestra tiene una densidad promedio de 10 Kg/m³, el cual tiene un valor de conductividad térmica conocida de 0,046 W/mK (ASHRAE Fundamental 2009). Al obtener los resultados de estas pruebas se calibro la caja caliente ya que los valores obtenidos fueron muy cercanos a los valores teóricos, validando de esta forma los resultados de las siguientes pruebas a las muestras en estudio.

La caja caliente a través del sistema de adquisición de datos nos suministra el registro de los valores de la temperatura de las superficies de las muestras, el flujo de calor además de las temperaturas y velocidades del aire que circula en ambas cámaras. Con

estos resultados organizados en forma matricial a través de Microsoft Office Excel graficamos el comportamiento del flujo de calor y temperaturas de ambos lados de las muestras para el análisis de estos y la depuración correcta de los datos que se encuentren en el intervalo donde la gráfica permanezca estable.

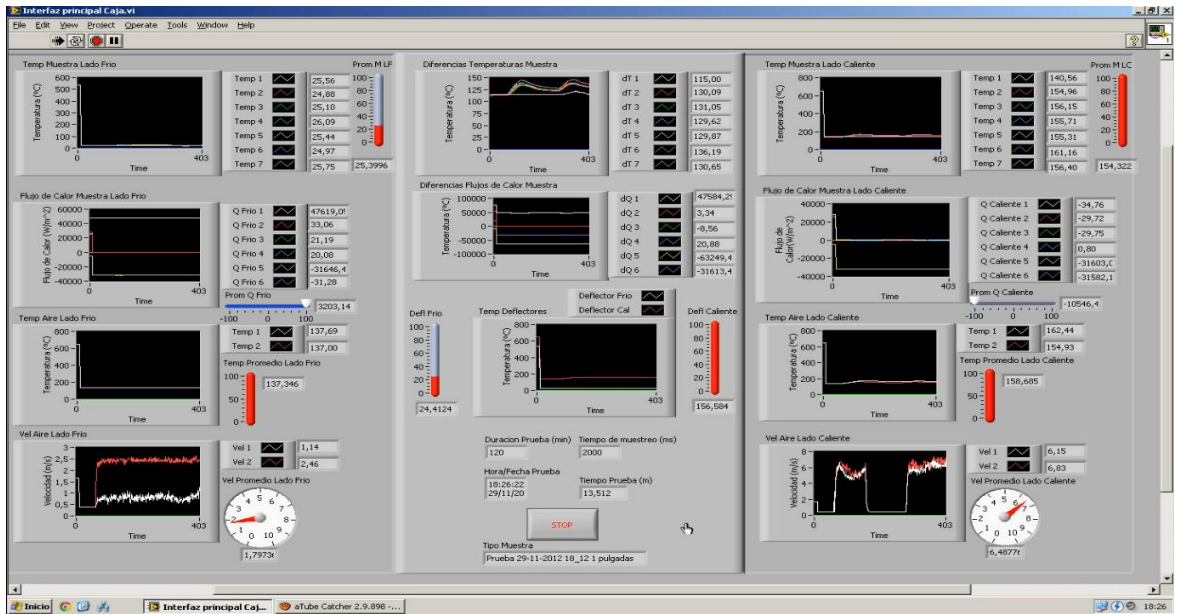


Figura 4. 1. Fotografía del cuadro de monitoreo de los sensores temperaturas y calor de la caja caliente a través de NI LabView 8.6 en una corrida de toma de datos

	T2 LF(°C)	T3 LF(°C)	T4 LF(°C)	T5 LF(°C)	T6 LF(°C)	T7 LF(°C)	Vel 1 LF (m/s)	Vel 2 LF (m/s)	TAZ LF(°C)	TAZ LF(°C)	TDEF LF (°F)	TROM MUL	TROM AIRE	Q1 LF (BTU/h)	Q2 LF (BTU/h)	Q3 LF (BTU/h)	Q4 LF (BTU/h)
1	23,728	23,354	20,77	24,568	21,829	1770	5,587	1,627	30,358	21,86	25,16	272,488	26,109	3592,663	3,234	-3,234	-3,673
2	23,447	23,105	20,428	24,288	21,486	1770	6,048	1,849	30,327	21,549	25,035	272,23	25,938	3592,663	3,125	-2,905	-3,344
3	22,949	22,732	20,272	23,821	21,113	23,603	5,942	1,733	30,296	20,677	24,848	22,42	25,486	3592,663	2,905	-2,448	-2,357
4	23,261	23,603	21,735	24,132	22,14	25,907	6,079	1,875	30,265	20,646	24,848	23,381	25,455	3592,663	2,248	-1,151	-0,932
5	24,008	24,599	23,105	24,848	23,292	27,774	6,64	1,91	30,296	21,175	24,879	24,466	25,735	3592,663	2,248	-1,37	-1,59
6	24,412	25,035	23,51	25,346	23,79	28,21	5,517	1,953	30,296	21,673	24,91	24,919	25,984	3592,663	2,248	-1,699	-2,028
7	24,506	24,942	23,136	25,409	23,603	27,712	6,163	1,793	30,296	21,953	24,848	24,777	26,125	3592,663	2,577	-2,357	-2,796
8	24,226	24,506	22,545	25,16	23,105	27,401	6,16	1,751	30,296	21,86	24,755	24,399	26,078	3592,663	2,577	-2,357	-2,467
9	24,039	24,288	22,327	24,942	22,856	27,245	5,996	1,716	30,296	21,673	24,693	24,19	25,984	3592,663	2,577	-2,138	-2,248
10	23,946	24,288	22,358	24,879	22,856	27,37	5,778	1,778	30,296	21,58	24,599	24,186	25,938	3592,663	2,467	-1,919	-1,138
11	24,039	24,412	22,607	24,973	23,043	27,65	6,144	1,815	30,296	21,673	24,599	24,35	25,984	3592,663	2,467	-1,919	-2,138
12	24,226	24,661	22,949	25,16	23,323	27,961	6,31	1,466	30,265	21,829	24,661	24,59	26,047	3592,663	2,467	-1,919	-2,028
13	24,412	24,848	23,167	25,346	23,51	28,179	6,2	2,017	30,265	21,953	24,661	24,795	26,109	3592,663	2,248	-1,809	-2,138
14	24,568	24,942	23,323	25,471	23,665	28,77	5,947	1,517	30,265	22,14	24,693	24,995	26,202	3592,663	2,357	-2,028	-2,248
15	24,381	24,724	22,887	25,191	23,354	28,117	5,756	1,789	30,265	22,078	24,599	24,661	26,171	3592,663	2,467	-2,248	-2,686
16	23,852	24,101	21,953	24,755	22,576	26,498	5,298	1,605	30,265	21,735	24,537	23,883	26	3592,663	2,905	-2,686	-3,015
17	23,261	23,323	20,864	24,163	21,673	30,669	5,777	1,771	30,265	21,175	24,35	23,817	25,72	3592,663	3,015	-2,577	-2,905
18	22,856	23,074	20,739	23,821	21,362	29,393	6,262	1,738	30,202	20,615	24,226	23,381	25,409	3592,663	2,577	-1,919	-2,028
19	23,043	23,479	21,517	23,977	21,891	30,514	5,89	1,796	30,202	20,584	24,226	23,874	25,393	3592,663	2,248	-1,37	-1,59
20	23,479	24,226	22,576	24,506	22,763	30,482	6,366	1,973	30,202	20,957	24,288	24,457	25,58	3592,663	2,248	-1,261	-1,48
21	23,852	24,537	22,763	24,848	23,074	32,879	6,645	1,823	30,202	21,3	24,288	25,066	25,751	3592,663	2,577	-2,028	-2,467
22	23,79	24,319	22,389	24,755	22,794	31,634	6,734	1,866	30,202	21,362	24,226	24,728	25,782	3592,663	2,577	-2,138	-2,248
23	23,79	24,35	22,514	24,786	22,856	32,132	6,017	1,717	30,265	21,393	24,226	24,839	25,829	3592,663	2,467	-1,809	-2,028
24	24,039	24,724	23,136	25,035	23,354	33,471	6,122	1,759	30,265	21,704	24,319	25,36	25,984	3592,663	2,248	-1,48	-1,809
25	24,288	24,879	23,167	25,222	23,479	33,564	6,159	1,61	30,265	21,953	24,319	25,502	26,109	3592,663	2,467	-2,028	-2,138
26	24,288	24,786	23,043	25,191	23,416	33,346	5,847	1,814	30,265	22,016	24,35	25,426	26,14	3592,663	2,467	-2,028	-2,248

Figura 4. 2. Ilustración de organización de datos en matriz de Excel almacenada por el software NI Labview 8.6 y sistema de adquisición de datos

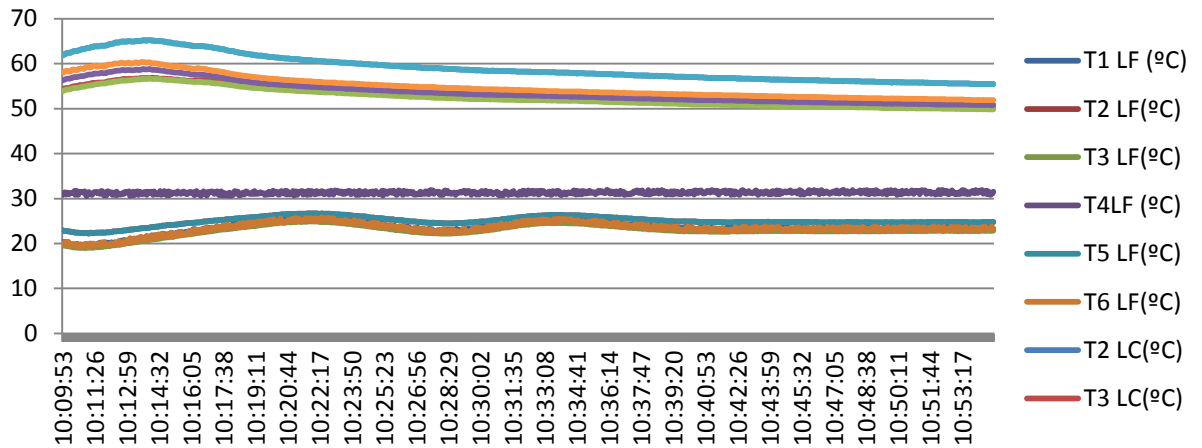


Figura 4. 3. Comportamiento de temperaturas muestra de poliestireno

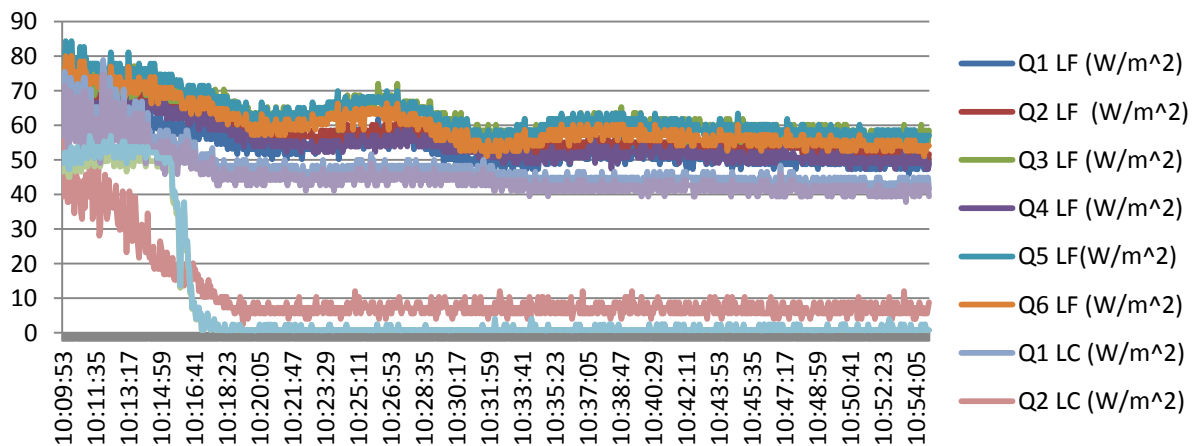


Figura 4. 4. Comportamiento del flujo de calor de poliestireno

Al obtener los datos y al realizar el respectivo análisis organizamos los datos en la siguiente tabla, donde en base a la conductividad térmica referenciada de 0,043 W/mK (ASHRAE Fundamental 2009), Validamos los resultados obtenidos por la Instalación de caja caliente de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Tabla 4. 6. Resultados del cálculo de la conductividad térmica Poliestireno.

VARIABLES	UNIDAD	VALORES		
TEMPERATURA PROMEDIO LADO FRIO	°C	25,4534	25,1455	27,9601
	K	298,4534	298,1455	300,9601
TEMPERATURA PROMEDIO LADO CALIENTE	°C	56,4943	55,2927	62,9588
	K	329,4943	328,2927	335,9588
FLUJO DE CALOR	W/m ² *K	58,8008	52,3942	64,0652
ESPESOR DE LA MUESTRA	mm	0,0250	0,0250	0,0250
CONDUCTIVIDAD TERMICA CALCULADA	W/m*K	0,0474	0,0434	0,0458
CONDUCTIVIDAD TERMICA REFERENCIADA	W/m*K	0,0460	0,0460	0,0460
ERROR	%	-2,9511	5,5465	0,5164

Una vez calibrada la Caja caliente procedimos a realizar las pruebas a las diferentes probetas las cuales describiremos en la siguiente **figura 4.3, figura 4.4, figura 4.5 y tabla 4.2:**

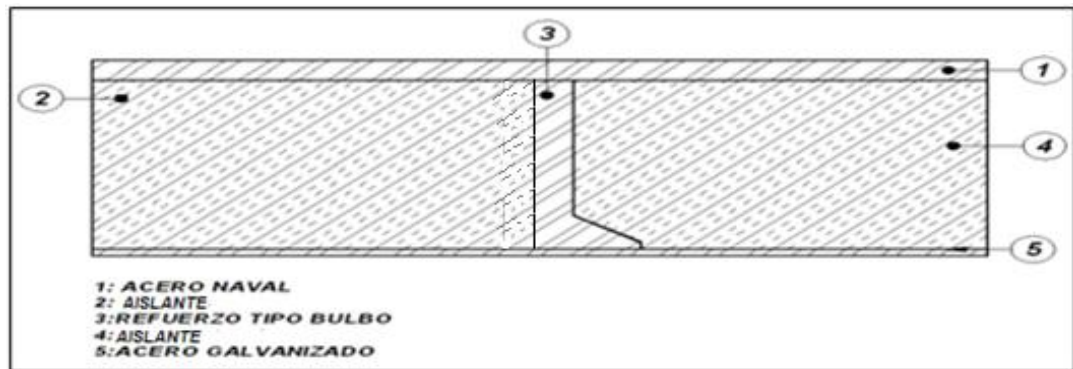


Figura 4. 5. Distribución de materiales probetas de 75 mm de aislante

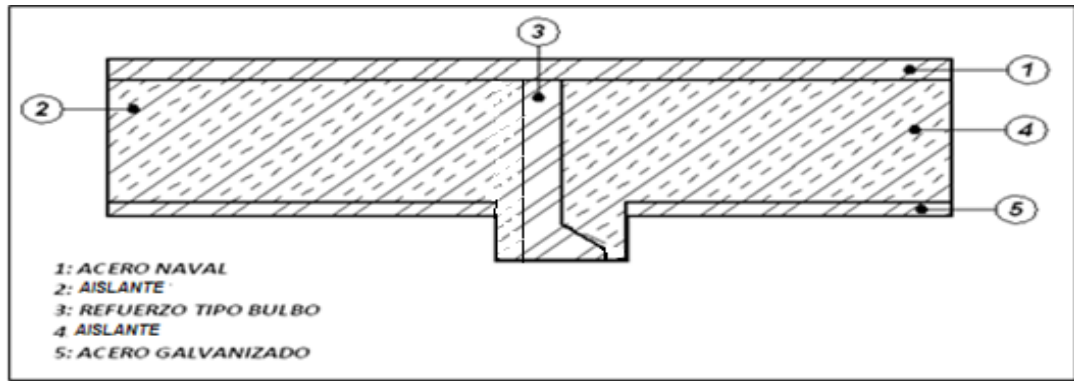


Figura 4. 6. Distribución de materiales probetas de 50 mm de aislante

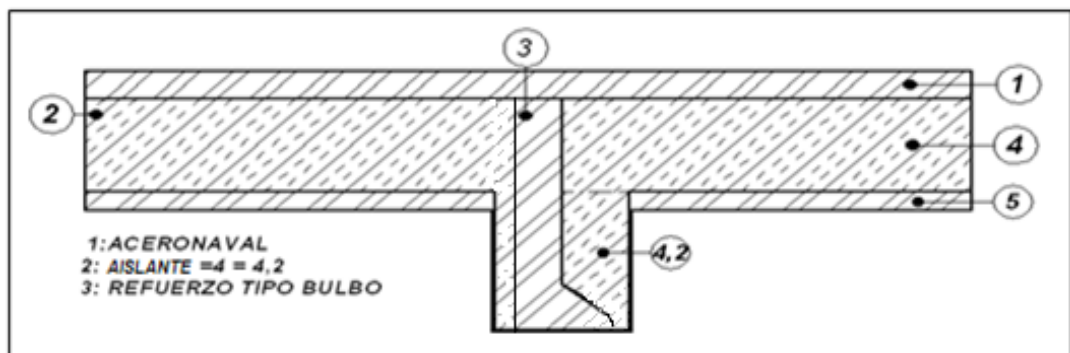
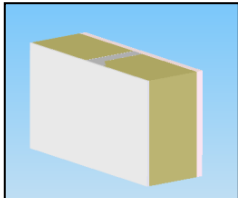
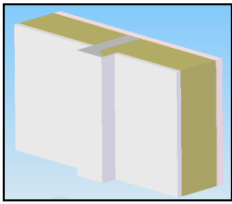
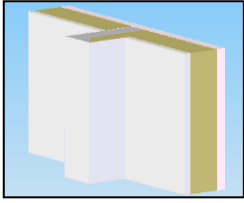


Figura 4. 7. Distribución de materiales probetas de 25 mm de aislante

Tabla 4. 7. Figuras y medidas de los tipos de muestras

MUESTRAS EXPERIMENTALES				
PROBETA	FIGURAS	DIMENSIONES		
	ISOMETRICO	Espesor aislante (L) mm	Ancho o Base (B) mm	Altura (H) mm
1		75	500	450

2		50	500	450
3		25	500	450

Posteriormente se empezó con las corridas de toma de datos de cada una de las probetas, como se indicó anteriormente estas tuvieron una duración aproximada de 20 horas, con dos repeticiones por cada una, al igual que en el caso del poliestireno expandido (ESP).

Tabulamos y graficamos las temperaturas y los flujos de calor medidos para su organización y cálculos respectivos, el comportamiento de estas graficas para cada material en los diferentes espesores era prácticamente igual por esta razón solo enseñaremos uno por material.

4.1.1.3. Resultado de pruebas a envoltentes de Poliuretano

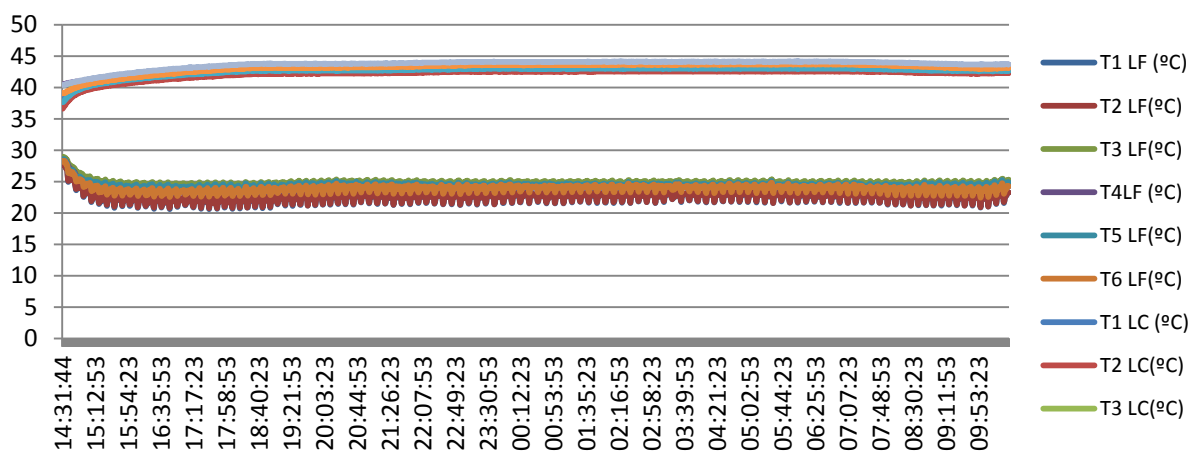


Figura 4. 8. Comportamiento de temperaturas superficiales muestra de poliuretano 25 mm

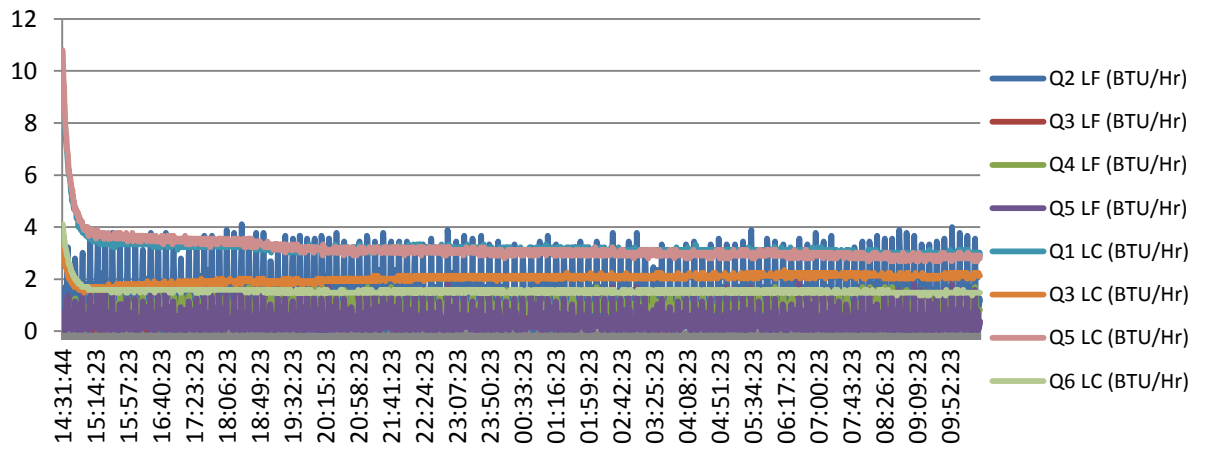


Figura 4. 9. Comportamiento del flujo de calor muestra de poliuretano 25 mm

Tabla 4. 8. Resultado final de los cálculos para las muestras de poliuretano

VARIABLES	Unidad	POLIURETANO		
		Espesor 25 mm	Espesor 50 mm	Espesor 75 mm
TEMPERATURA MEDIA SUPERFICIE LADO FRIO	C	34,817	34,675	34,523
	K	307,817	307,675	307,523
TEMPERATURA MEDIA SUPERFICIE LADO CALIENTE	C	50,0145	51,41	63,291
	K	323,0145	324,41	336,291
FLUJO DE CALOR PROMEDIO	W/m2	40,828	29,178	24,567
CONDUCTANCIA	W/m2*K	2,688	1,743	0,861
VELOCIDAD DEL AIRE LADO FRIO	m/s	0,395	0,3945	0,428
VELOCIDAD DEL AIRE LADO CALIENTE	m/s	0,877	0,8215	0,819
COEFICIENTE PELICULAR ho	W/m2*K	9,0405	8,825	8,814
COEFICIENTE PELICULAR hi	W/m2*K	7,159	7,1585	7,2885
INCERTIDUMBRE	NA	±0,223	±0,102	±0,218
COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR	W/m2*K	1,606	1,209	0,708

4.1.1.4. Resultado de pruebas a envoltentes de Lana de Roca

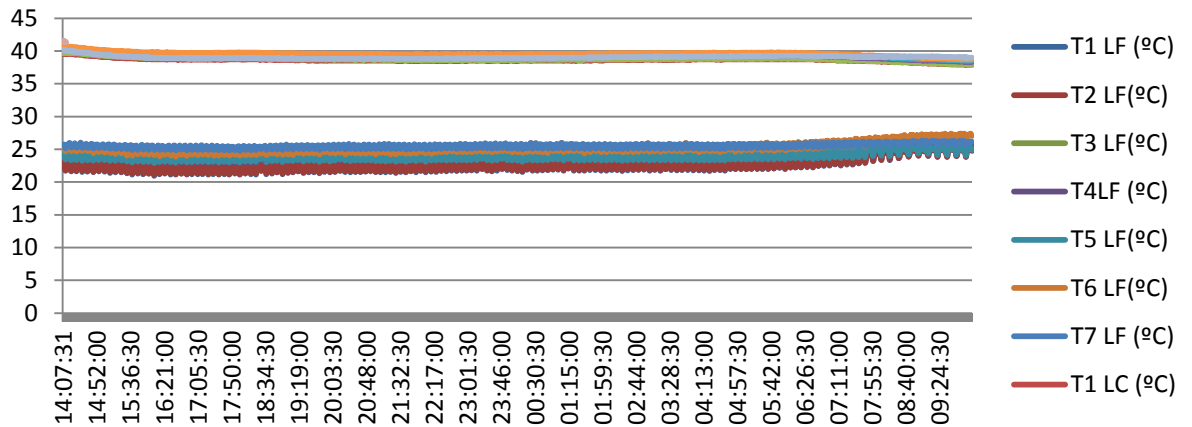


Figura 4. 10. Comportamiento de temperaturas superficiales muestra de Lana de roca 25 mm

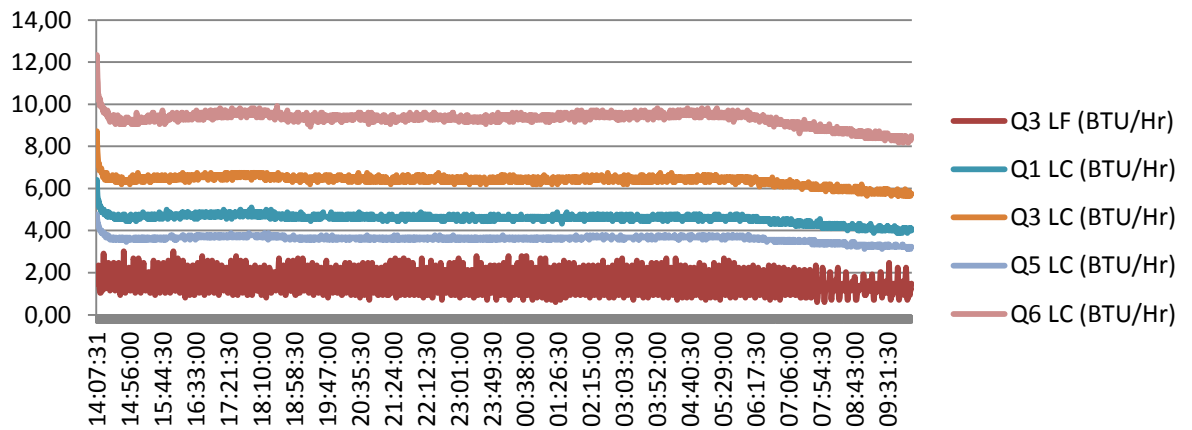


Figura 4. 11. Comportamiento del flujo de calor muestra de Lana de roca 25 mm

Tabla 4. 9. Resultado final de los cálculos para las muestras de Lana de roca

VARIABLES	Unidad	LANA DE ROCA		
		Espesor 25 mm	Espesor 50 mm	Espesor 75 mm
TEMPERATURA MEDIA SUPERFICIE LADO FRIO	C	35,2215	33,102	32,7835
	K	308,2215	306,102	305,7835
TEMPERATURA MEDIA SUPERFICIE LADO CALIENTE	C	54,0355	42,53	44,986
	K	327,0355	315,53	317,986
FLUJO DE CALOR PROMEDIO	W/m2	59,9295	25,9965	31,8495
CONDUCTANCIA	W/m2*K	3,174	2,77	2,61
VELOCIDAD DEL AIRE LADO FRIO	m/s	0,3945	0,3945	0,394
VELOCIDAD DEL AIRE LADO CALIENTE	m/s	0,9805	0,895	0,8345
COEFICIENTE PELICULAR ho	W/m2*K	9,443	9,1095	8,8735
COEFICIENTE PELICULAR hi	W/m2*K	7,158	7,1585	7,1575
INCERTIDUMBRE	NA	±0,223	±0,102	±0,218
COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR	W/m2*K	1,783	1,638	1,573

4.1.1.5. Resultado de pruebas a envoltentes de Fibra de vidrio

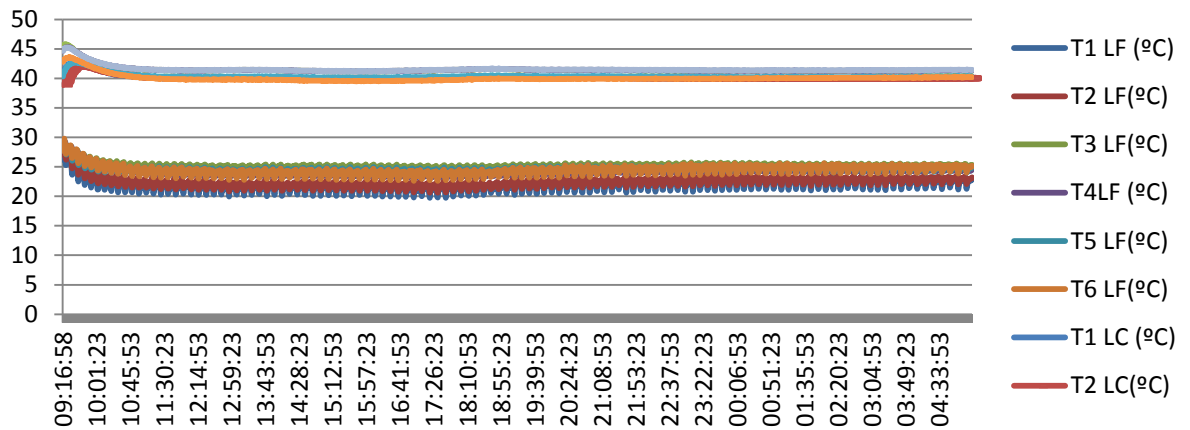


Figura 4. 12. Comportamiento de temperaturas superficiales muestra de Fibra de Vidrio 25 mm

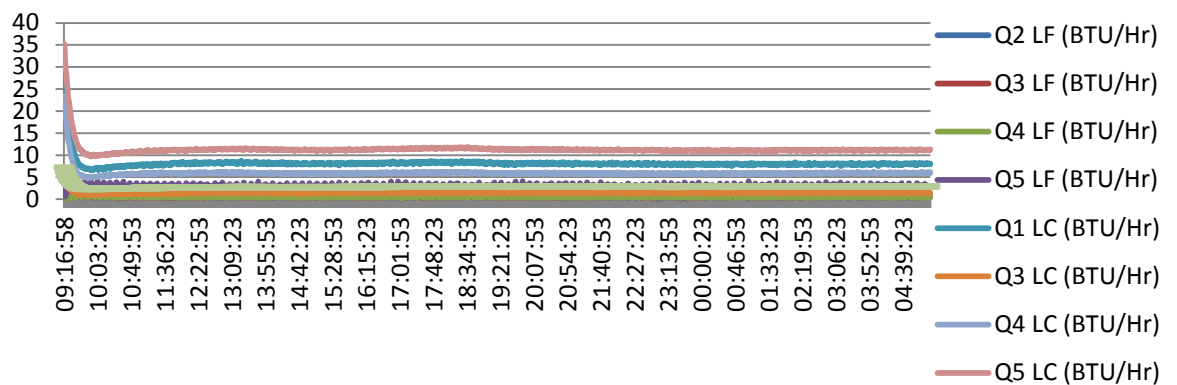


Figura 4. 13. Comportamiento del flujo de calor muestra de Fibra de Vidrio 25 mm

Tabla 4. 10. Resultado final de los cálculos para las muestras de Fibra de Vidrio

VARIABLES	Unidad	FIBRA DE VIDRIO		
		Espesor 25 mm	Espesor 50 mm	Espesor 75 mm
TEMPERATURA MEDIA SUPERFICIE LADO FRIO	C	35,1475	34,1295	36,4095
	K	308,1475	307,1295	309,4095
TEMPERATURA MEDIA SUPERFICIE LADO CALIENTE	C	55,305	55,204	72,7575
	K	328,305	328,204	345,7575
FLUJO DE CALOR PROMEDIO	W/m ²	71,583	65,5795	84,516
CONDUCTANCIA	W/m ² *K	3,5945	3,119	2,3075
VELOCIDAD DEL AIRE LADO FRIO	m/s	0,3945	0,4835	0,395
VELOCIDAD DEL AIRE LADO CALIENTE	m/s	0,9075	0,856	0,832
COEFICIENTE PELICULAR ho	W/m ² *K	9,1605	8,959	8,8645
COEFICIENTE PELICULAR hi	W/m ² *K	7,1585	7,504	7,16
INCERTIDUMBRE	NA	±0,223	±0,102	±0,218
COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR	W/m ² *K	1,897	1,768	1,458

Los resultados obtenidos de los tres materiales con sus respectivos espesores se resumen en la tabla 4.11.

Tabla 4. 11. Resultado final de todos los materiales del método de la caja caliente

Espesor mm	Coeficiente global de transferencia de calor W/m ² K		
	Poliuretano	Lana de roca	Fibra de vidrio
25	1,607	1,784	1,897
50	1,210	1,638	1,768
75	0,708	1,573	1,458

4.2. RESULTADOS MÉTODO DE LA ZONA

4.2.1 Descripción del procedimiento

Este método es usado para determinar la transmitancia y/o resistencia de una estructura con elementos metálicos de una sección de área transversal sustancial es decir considerable en la construcción; consiste en dos cálculos separados, uno para una parte limitada elegida, una zona A que contiene el elemento de alta conductividad (Refuerzo) y otro para la parte restante de la construcción más simple, la zona B. Los dos cálculos son combinados utilizando el método de flujo paralelo, y se calcula la transmitancia media por unidad de superficie total. Las leyes básicas de la transferencia de calor se aplican mediante la adición de las conductancias área de $\left[CA = \left(\frac{R}{A}\right)\right]$ de los elementos que conforman la construcción en paralelo, y la adición de resistencias área de $\frac{R}{A}$ de los elementos en serie.

Para determinar el coeficiente Global de transferencia de calor de las probetas correspondientes a las partes internas y externas (mamparos y casco respectivamente) del buque tipo nodriza fluvial aplicamos este método, teniendo en cuenta que estas muestras poseen características constructivas que lo requiere, es decir todas son

envolventes (tipo sándwich), algunas poseen refuerzos, todas tienen materiales metálicos entre otros y son sometidas a condiciones de transferencia de calor; En las tablas e ilustraciones mostradas a continuación podemos distinguir los tipos de muestras y sus configuraciones constructivas:

Tabla 4. 12. Configuraciones de las muestras a evaluar

Material	Especificaciones	Conductividad térmica W/mK
Acero Naval	En estas muestras se usa una lámina de este material con espesor de 0,67 cm, 450 mm de alto y 500 mm de ancho.	60,4
Acero-Refuerzo	Se usa este material como refuerzo en la muestra, tipo bulbo HP 80*6	60,4
Aislante	Poliuretano	0,026
	Lana de Roca	0,037
	Fibra de vidrio	0,042
Acero Galvanizado	Este material se usa en lamina para cada muestra, la cual mide aproximadamente 1 mm de espesor	176,4

De acuerdo a las figuras 3, 4, 5 se realizó el siguiente procedimiento, para mayor comprensión observar la figura 6 y 7 donde se muestran los datos requeridos para el cálculo.

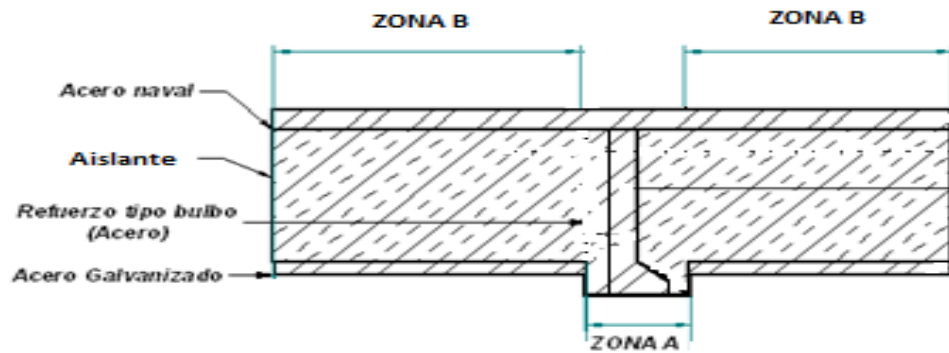


Figura 4. 14. Esquema superior de las muestras

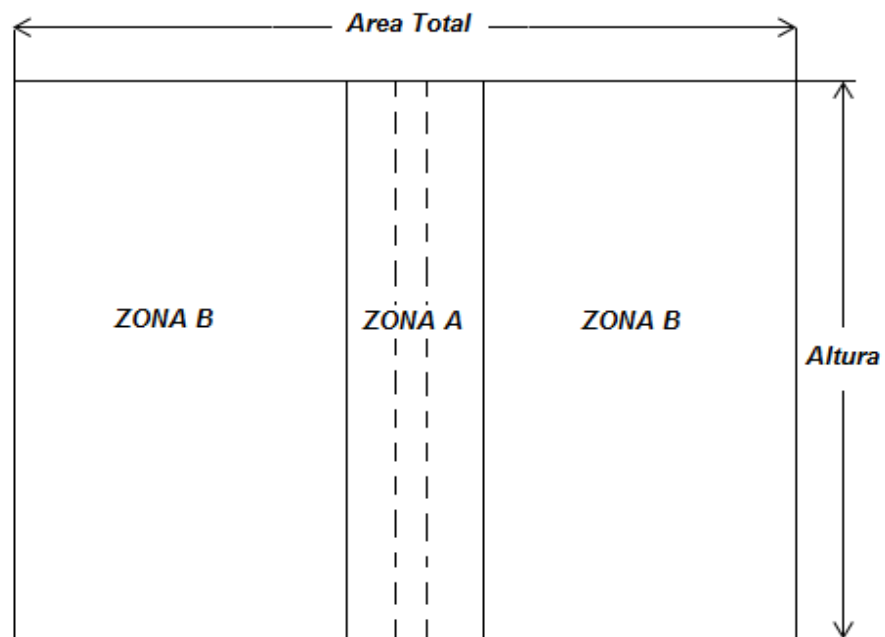


Figura 4. 15. Vistas frontal representativas de las muestras

1. Teniendo en cuenta las especificaciones aplicamos la siguiente ecuación según el tipo de muestra para calcular el valor teórico de w :

$$w = m + 2d \quad (4.7)$$

Dónde:

w : Anchura de la viga o muestra

m : Anchura o longitud del patin del refuerzo de la muestra.

d : Distancia desde la superficie externa de la muestra al patin del refuerzo.

(Nota: En el caso de las muestras a evaluar, valor de w se puede hallar tomando las medidas de ellas de forma directa, es decir de manera practica con un instrumento de medida, pero se aplica esta ecuación para seguir con la secuencia de este método y calcular el valor teórico como lo requiere.)

Para realizar el cálculo de la ecuación (1) a cada tipo de muestra debemos tener en cuenta las siguientes ilustraciones, donde podemos identificar la nomenclatura que sugiere este método aplicado a cada una de ellas:

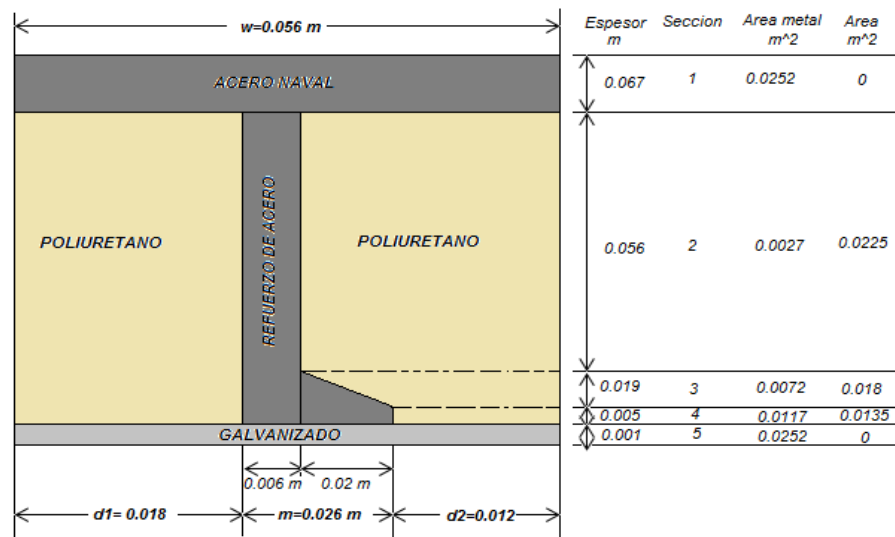


Figura 4. 16. Distribución de materiales, áreas y dimensiones de la Zona A

$$w = m + (d_1 + d_2)(2)$$

$$m = 0.026m$$

$$d_1 = 0.018m$$

$$d_2 = 0.012m$$

$$\text{Entonces, } w = 0.026m + (0.018 + 0.012)cm$$

$$w = 0.056m$$

$$\text{Area total} = \text{Area A} + \text{Area B}$$

$$B * H = (W * H) + Area B$$

$$0.5 m * 0.45m = (0.056m * 0.45m) + Area B$$

$$Area Total = 0.225m^2$$

$$Area B = 0.1998m^2$$

$$Area A = 0.0252m^2$$

Una vez obtuvimos las áreas de ambas zonas, para obtener el coeficiente global de transferencia de calor de las muestras, dividimos la estructura de la zona A en 5 secciones paralelas a las superficies de transferencia, luego calculamos la resistencia de cada material en función de su área, teniendo en cuenta cuales materiales están en serie y cuales están en paralelo dentro de la zona, el procedimiento se realizó para cada una de las muestras con sus respectivos espesores, lo podemos observar claramente en las siguientes tablas.

4.2.2. Calculo para las muestras

4.2.2.1. Poliuretano

Zona A

Tabla 4. 13. Calculo de las resistencias de los materiales de la zona A para muestra de poliuretano de 25 mm según el método de la zona

<i>Seccion</i>	<i>Material</i>	<i>Area x Conductancia =</i>	<i>CA</i>	$\frac{1}{\frac{CA}{R}} = \frac{R}{A}$
1	<i>Acero naval</i>	0.0252 * 60.4/0.067	22.7176	0.0440
	<i>Poliuretano</i>	0.0225 * 0.026/0.056	0.0104	
2	<i>Refuerzo de Acero</i>	0.0027 * 60.4/0.056	2.91214	0.3433
	<i>Poliuretano</i>	0.018 * 0.026/0.019	0.0246	
3	<i>Refuerzo de Acero</i>	0.0072 * 60.4/0.019	22.8884	0.0436
	<i>Poliuretano</i>	0.0135 * 0.026/0.005	0.0702	
4	<i>Refuerzo de Acero</i>	0.0117*60.4/0.005	141.336	0.0070
5	<i>Galvanizado</i>	0.0252*176.4/0.001	4445.28	0.0002

Nota: La conductancia se calcula en base a los valores de la tabla 8, dividiendo los valores de la conductividad de cada material por su espesor.

$$\Sigma \frac{R}{A} = 0.4384 \text{ Km}^2/W$$

$$\text{Transmitancia de la Zona A} = 1 / \left(\frac{R}{A} \right) = \frac{1}{0.4384} = 2.2810 \frac{W}{m^2K}$$

Para la zona B dividimos su estructura en 3 secciones que corresponden a los materiales que esta contiene, en este caso todos se encuentran en serie por lo cual el cálculo resulta mucho más sencillo, simplemente determinando las resistencia de cada uno de sus materiales, luego invertimos su valor y multiplicando por el área para obtener la transmitancia de esta zona tal y como nos lo indica el método.

Tabla 4. 14. Calculo de las resistencias de los materiales de la zona B para muestra de poliuretano de 25 mm según el método de la zona

Sección	Material	Resistencia	R
1	Acero Naval	0.0067/60.4	0.00011
2	Poliuretano	0.025/0.026	0.9615
3	Galvanizado	0.001/176.4	5.6689x10 ⁻⁶
Resistencia Total			= 0.9616

La transmitancia de la zona B = $1/R$ * Area de la zona

$$\text{Transmitancia de la zona B} = 1/0.9616 = 1.0398 \frac{W}{K} * 0.1998 = 0.2077 \frac{W}{m^2K}$$

Coeficiente Global transferencia de calor Transmitancia Zona A + Transmitancia Zona B

$$U_{total} = U_{Zona A} + U_{Zona B}$$

$$U_{total} = 2.2810 \frac{W}{m^2K} + 0.2077 \frac{W}{m^2K} = 2.4887 \frac{W}{m^2K}$$

4.2.2.2. Lana de Roca

Zona A

Tabla 4. 15. Calculo de las resistencias de los materiales de la zona A para muestra de lana de roca de 25 mm según el método de la zona

<i>Seccion</i>	<i>Material</i>	<i>Area x Conductancia =</i>	<i>CA</i>	$\frac{1}{CA} = \frac{R}{A}$
1	<i>Acero naval</i>	$0.0252 * 60.4/0.067$	22.7176	0.0440
	<i>Lana de roca</i>	$0.0225 * 0,037/0.056$	0,014866071	
2	<i>Refuerzo de Acero</i>	$0.0027 * 60.4/0.056$	2.91214	0.3433
	<i>Lana de roca</i>	$0.018 * 0,037/0.019$	0,035052632	
3	<i>Refuerzo de Acero</i>	$0.0072 * 60.4/0.019$	22.8884	0.0436
	<i>Lana de roca</i>	$0.0135 * 0,037/0.005$	0,0999	
4	<i>Refuerzo de Acero</i>	$0.0117 * 60.4/0.005$	141.336	0.0070
5	<i>Galvanizado</i>	$0.0252 * 176.4/0.001$	4445.28	0.0002

$$\Sigma \frac{R}{A} = 0.4384 \text{ Km}^2/W$$

$$\text{Transmitancia de la Zona A} = \frac{1}{\left(\frac{R}{A}\right)} = \frac{1}{0.4384} = 2.2810 \frac{W}{m^2K}$$

Tabla 4. 16. Calculo de las resistencias de los materiales de la zona B para muestra de lana de roca de 25 mm según el método de la zona

<i>Sección</i>	<i>Material</i>	<i>Resistencia</i>	<i>R</i>
1	Acero Naval	$0.0067/60.4$	0.00011
2	Lana de roca	$0.025/0,037$	0,675675676
3	Galvanizado	$0.001/176.4$	5.6689×10^{-6}
<i>Resistencia Total</i>			$=0,6757$

La transmitancia de la zona B = $1/R$ * Area de la zona

$$\text{Transmitancia de la zona B} = 1/0,6757 = 1,4797 \frac{W}{K} * 0.1998 = 0,2956 \frac{W}{m^2K}$$

Coficiente Global de transferencia de calor

$$= \text{Transmitancia Zona A} + \text{Transmitancia Zona B}$$

$$U_{total} = U_{Zona A} + U_{Zona B}$$

$$U_{total} = 2.2810 \frac{W}{m^2K} + 0,2956 \frac{W}{m^2K} = 2,5766 \frac{W}{m^2K}$$

4.2.2.3. Fibra de Vidrio

Zona A

Tabla 4. 17. Calculo de las resistencias de los materiales de la zona A para muestra de lana de roca de 25 mm según el método de la zona

Seccion	Material	Area x Conductancia =	CA	$\frac{1}{CA} = \frac{R}{A}$
1	Acero naval	0.0252 * 60.4/0.067	22.7176	0.0440
	Fibra de Vidrio	0.0225 * 0,042/0.056	0,016875	
2	Refuerzo de Acero	0.0027 * 60.4/0.056	2.91214	0.3433
	Fibra de Vidrio	0.018 * 0,042/0.019	0,039789474	
3	Refuerzo de Acero	0.0072 * 60.4/0.019	22.8884	0.0436
	Fibra de Vidrio	0.0135 * 0,042/0.005	0,1134	
4	Refuerzo de Acero	0.0117 * 60.4/0.005	141.336	0.0070
5	Galvanizado	0.0252 * 176.4/0.001	4445.28	0.0002

$$\Sigma \frac{R}{A} = 0.4384 \text{ Km}^2/W$$

$$\text{Transmitancia de la Zona A} = 1 / \left(\frac{R}{A} \right) = \frac{1}{0.4384} = 2.2810 \frac{W}{m^2 K}$$

Tabla 4. 18. Calculo de las resistencias de los materiales de la zona B para muestra de fibra de vidrio de 25 mm según el método de la zona

<i>Sección</i>	<i>Material</i>	<i>Resistencia</i>	<i>R</i>
1	Acero Naval	0.0067/60.4	0.00011
2	Fibra de vidrio	0.025/0,042	0,675675676
3	Galvanizado	0.001/176.4	5.6689x10 ⁻⁶
<i>Resistencia Total</i>			= 0,5952

*La transmitancia de la zona B = 1/R * Area de la zona*

$$\text{Transmitancia de la zona B} = 1/0,6757 = 1,6796 \frac{W}{K} * 0.1998 = 0,33559 \frac{W}{m^2 K}$$

Coficiente Global de trasnferecia de calor

$$= \text{Transmitancia Zona A} + \text{Transmitancia Zona B}$$

$$U_{total} = U_{Zona A} + U_{Zona B}$$

$$U_{total} = 2.2810 \frac{W}{m^2 K} + 0,33559 \frac{W}{m^2 K} = 2,61662 \frac{W}{m^2 K}$$

El procedimiento anterior se realizó con cada uno de los materiales en sus diferentes espesores, resumiendo los resultados en la tabla 14.19

Tabla 4. 19. Resultados Finales Obtenidos con el método de la zona

ESPESOR	Coeficientes globales de Transferencia de calor W/m^2K		
	Poliuretano	Lana de Roca	Fibra de vidrio
25 mm	2,4888	2,5767	2,6166
50 mm	2,3849	2,4289	2,4488
75 mm	2,3503	2,3796	2,3929

Al realizar el procedimiento que indica la norma, se evidencio que el procedimiento es un poco largo y repetitivo por lo cual determinamos una ecuación la cual podemos utilizar para simplificar los cálculos y obtenido de forma directa los resultados para el método de la zona aplicado a este tipo de envolventes.

La siguiente ecuación (4.8) está en función de la conductividad térmica del material aislante y su respectivo espesor, con estos dos valores es suficiente para determinar el coeficiente global de transferencia de calor según el método de la Zona.

$$U = 2.2810 + \frac{0.1998 \times C_{Aislante}}{0.001105669 \times C_{aislante} + E_{asilante}} \left(W/m^2K \right) \quad (4.8)$$

CAPÍTULO 5

5. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1. ANALISIS DE RESULTADOS METODO DE LA CAJA CALIENTE

Inicialmente se organizaron los resultados en la tabla 5.1. Para mejor una mejor comprensión.

Tabla 5. 1.Coefficientes “U” en unidades Internacionales e Inglesas

Coefficiente global de trasferencia de calor calculado por la caja caliente.		
Poliuretano		
Espesor	(W/m²*K)	(BTU/h*ft²*F)
25 mm	1,607	0,283
50 mm	1,210	0,213
75 mm	0,708	0,125
Lana de roca		
Espesor	(W/m²*K)	(BTU/h*ft²*F)
25 mm	1,784	0,314
50 mm	1,638	0,288
75 mm	1,573	0,277
Fibra de vidrio		
Espesor	(W/m²*K)	(BTU/h*ft²*F)
25 mm	1,897	0,334
50 mm	1,768	0,311
75 mm	1,458	0,257

Como primer análisis de la información al ordenar los valores de los coeficientes calculados determinamos el orden de los envoltentes de menor a mayor conductor de calor, es decir cuál de los materiales es más óptimo como aislante térmico; el orden es el siguiente:

1. Envoltentes con material aislante de Poliuretano.
2. Envoltentes con material aislante de Lana de Roca.
3. Envoltentes con material aislante de Fibra de Vidrio.

5.2. RESULTADOS OBTENIDOS VS REPORTE SNAME

Los valores de los coeficientes globales de transferencia de calor obtenidos por el método de la caja caliente son valores acordes a los esperados, si tomamos como referencia a los máximos permitidos por la sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos (SNAME), Ver **Tabla 1.2**. Estos se encuentran en el rango de acuerdo al intervalo de temperaturas que las muestras son sometidas en condiciones reales; lo cual también nos indica que los tres materiales estudiados podrían cumplir su función como aislantes térmicos en los envolventes, por otra parte también es claro que el poliuretano registra los valores más bajos de coeficientes calculados seguidos por los de lana de roca y fibra de vidrio, lo cual es lógico evidenciando el correcto funcionamiento de la caja caliente.

Tabla 1. 2. Valores máximos de “U” según el rango de temperaturas

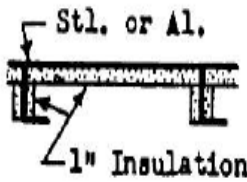
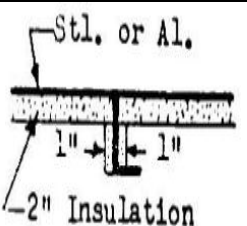
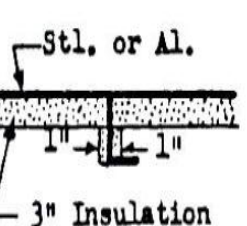
Diferencia de temperaturas °F	Valores máximos "U"
0°-15°	1.75
16°-30°	0.37
31°-50°	0.26
sobre 50°	0.16

Fuente: Thermal Insulation Report (SNAME).

Se realizó un análisis en el cual se compara los coeficientes de transferencia de calor calculados en la caja caliente para los tres espesores disponibles en sus respectivos materiales aislantes, con el reporte de la SNAME (**ver tabla 5.3**) el cual es usado como guía actualmente por COTECMAR para la determinación de los coeficientes según el tipo de construcción y espesor usado; es importante mencionar que dicho reporte debido a su antigüedad la geometría de las estructuras presentadas no son exactamente iguales a las utilizadas y evaluadas en el presente trabajo, además los valores de “U” son en base al material aislante de Fibra de Vidrio, sin embargo la

comparación presentada, servirá como referencia para evidenciar el sobredimensionamiento en la metodología SNAME.

Tabla 5. 2. Coeficiente global de transferencia de calor en Envolventes de construcción según el espesor Del asilamiento de Fibra de Vidrio, y la dirección Del flujo de calor.

← TIPO DE CONSTRUCCION	TEMPORADA	CONDICION DE EXPOSICION	COEFICIENTE "U" (BTU/h*ft ² *F)		
			DIRECCION DEL FLUJO		
			↑	↔	↓
	CALENTAMIENTO	RADIACION SOLAR	----	0,365	0,357
		TIEMPO DE VIENTO A AIRE INTERIOR	0,345	0,34	0,33
		AGUA DE MAR A AIRE INTERIOR	----	0,333	0,326
	ENFRIAMIENTO	AIRE A AIRE INTERIOR	0,329	0,316	0,3
		TIEMPO DE VIENTO A AIRE INTERIOR	0,334	0,318	0,301
		AGUA DE MAR A AIRE INTERIOR	0,344	0,33	----
	CALENTAMIENTO	RADIACION SOLAR	----	0,259	0,255
		TIEMPO DE VIENTO A AIRE INTERIOR	0,247	0,242	0,235
		AGUA DE MAR A AIRE INTERIOR	----	0,236	0,231
	ENFRIAMIENTO	AIRE A AIRE INTERIOR	0,245	0,232	0,222
		TIEMPO DE VIENTO A AIRE INTERIOR	0,244	0,231	0,219
		AGUA DE MAR A AIRE INTERIOR	0,249	0,236	----
	CALENTAMIENTO	RADIACION SOLAR	----	0,209	0,204
		TIEMPO DE VIENTO A AIRE INTERIOR	0,201	0,194	0,188
		AGUA DE MAR A AIRE INTERIOR	----	0,194	0,184
	ENFRIAMIENTO	AIRE A AIRE INTERIOR	0,201	0,192	0,182
		TIEMPO DE VIENTO A AIRE INTERIOR	0,204	0,191	0,18
		AGUA DE MAR A AIRE INTERIOR	0,209	0,195	----
		AIRE A AIRE INTERIOR	0,189	0,177	0,168

Fuente: Thermal Insulation Report (SNAME).

En la tabla 5.3 se comparan los valores establecidos por la SNAME de "U" para Fibra de Vidrio en tres espesores para la temporada de calentamiento en la condición de exposición de aire a aire en el interior, con incidencia paralela a las superficies de transferencia, tal y como fueron simuladas; con los resultados obtenidos en la investigación; calculando el porcentaje de diferencia entre ambos valores.

Tabla 5. 3. Diferencias entre resultados y metodología SNAME

ESPEORES	COEFICIENTE "U" (BTU/h*ft ² *F) SNAME	COEFICIENTE "U" (BTU/h*ft ² *F) CAJA CALIENTE			DIFERENCIA		
		Poliuretano	Lana de roca	Fibra de vidrio	Poliuretano	Lana de roca	Fibra de vidrio
1 in (25,4 mm)	0,316	0,283	0,314	0,334	10,44%	0,63%	5,38%
2 in (50,8 mm)	0,232	0,213	0,288	0,311	8,19%	24,14%	34,05%
3 in (76,2 mm)	0,192	0,125	0,277	0,257	34,90%	44,27%	33,33%

De la anterior tabla se concluyó que los valores de la SNAME presentan diferencias con los determinados en la investigación, aunque no podemos hacer una comparación entre los valores ya que como se mencionó, las estructuras presentadas por el reporte y las estudiadas, tienen diferencias en su geometría además que la composición de los materiales aislantes difieren, sin embargo lo que si es claro es que materiales como el poliuretano y la lana de roca serían mucho más eficientes que si se emplea fibra de vidrio.

5.2 RESULTADOS OBTENIDOS vs METODO DE ZONA

En los resultados se evidencio que en ambos métodos los coeficientes calculados de las muestras variaron en función de las conductividades térmicas de los materiales aislantes que estas contienen es decir que los menores conductores de calor fueron aquellas que poseen menor conductividad.

Tabla 5. 4. Tabla comparativa de resultados finales de ambos métodos

Coefficiente global de transferencia de calor (W/m²*K)		
Poliuretano		
Espesor	U- Caja caliente	U -Zona
25 mm	1,607	2,4888
50 mm	1,210	2,3849
75 mm	0,708	2,3503
Lana de roca		
Espesor	U- Caja caliente	U -Zona
25 mm	1,784	2,6805
50 mm	1,638	2,4808
75 mm	1,573	2,4142
Fibra de vidrio		
Espesor	U- Caja caliente	U -Zona
25 mm	1,897	2,5767
50 mm	1,768	2,4289
75 mm	1,458	2,3796

Estos resultados a simple vista son bastante lógicos pero analizando los resultados en conjunto es notorio que el comportamiento de las muestras al ir aumentando de espesor la conductividad difiere en los intervalos; en el caso del poliuretano la reducción de la conductancia disminuye en intervalos más grandes que la de los otros materiales, lo que en algunos casos se observa que para igualar el valor de la conductancia de los envolventes con poliuretano es necesario utilizar mayor cantidad de lana de roca y aun mas de fibra de vidrio. Es decir la tendencia a reducir el valor del coeficiente de transferencia de calor no es proporcional en los tres materiales; al

analizar las gráficas 5.1, 5.2, y 5.3 y las ecuaciones correspondientes a cada material las cuales representan el comportamiento del coeficiente, aunque en los tres casos las pendiente son negativas, no son iguales, lo cual nos indica que el porcentaje de reducción aplicando iguales cantidades de aislante difiere en los envoltentes.

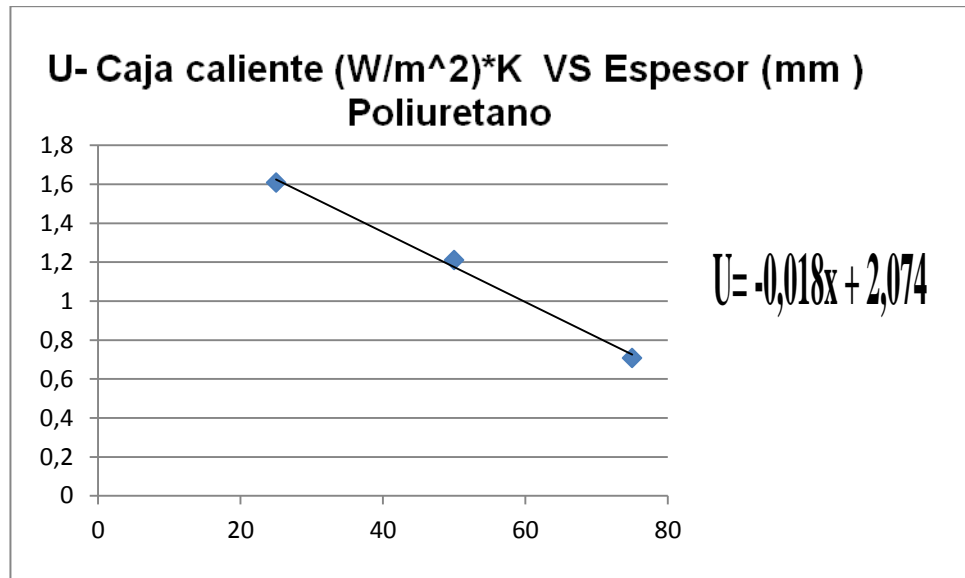


Figura 5. 1. Gráfica y ecuación del comportamiento muestras de poliuretano “U” vs espesor

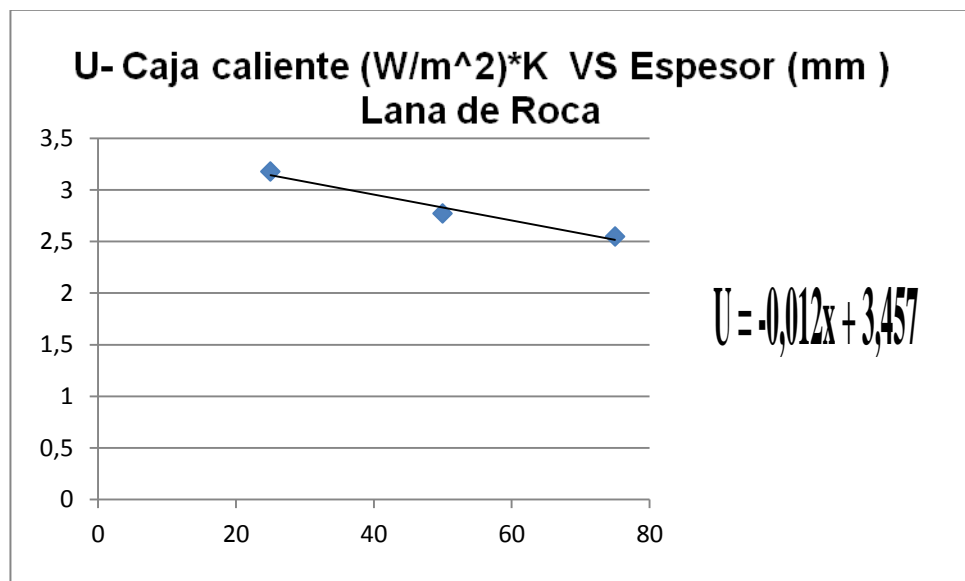


Figura 5. 2. Gráfica y ecuación del comportamiento muestras de Lana de Roca “U” vs espesor

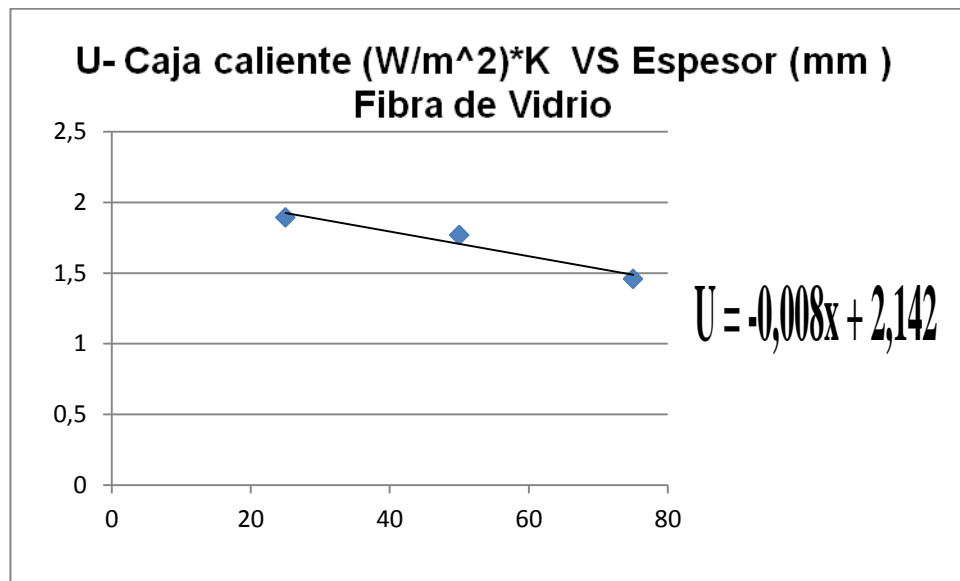


Figura 5. 3. Gráfica y ecuación del comportamiento muestras de Fibra de Vidrio “U” vs espesor

Por otra parte los resultados de los valores de los coeficientes globales de transferencia de calor calculados con el método de la caja caliente y el método de la zona presentan diferencias pero dentro de un rango de lo normal en el que se pueden estar este tipo de materiales, sin embargo se consideró que estas diferencias se deben a que el método de la zona fue validado en estructuras compuestas de varios materiales en estructuras tipo sándwich, los cuales son divididos en zonas de mayor y menor conductividad con el criterio que una de las áreas contenga material metálico, considerada la de alta conductividad mientras que la otra zona estaría conformada por materiales no metálicos de baja conductividad, y como observamos en nuestras muestras de envoltentes navales todas sus áreas tienen contenido de materiales metálicos como lo son el acero naval y el acero galvanizado, y al momento de aplicar el método de la zona a estas, consideramos las dos zonas pero ambas tienen contenido metálico en la totalidad de sus áreas de transferencia haciendo que estas resulten diferentes al tipo de muestras en el que el método fue probado y validado, pudiendo ser esta la causa de las variaciones en los resultados entre los dos métodos.

Tabla 5. 5. Tabla comparativa de resultados finales de ambos métodos

Coefficiente global de transferencia de calor (W/m²*K)			
Poliuretano			
Espesor	U- Caja caliente	U -Zona	% De diferencias
25 mm	1,607	2,4888	0,549
50 mm	1,210	2,3849	0,972
75 mm	0,708	2,3503	2,319
Lana de roca			
Espesor	U- Caja caliente	U -Zona	
25 mm	1,784	2,6805	0,503
50 mm	1,638	2,4808	0,514
75 mm	1,573	2,4142	0,534
Fibra de vidrio			
Espesor	U- Caja caliente	U -Zona	
25 mm	1,897	2,5767	0,358
50 mm	1,768	2,4289	0,374
75 mm	1,458	2,3796	0,632

En el análisis de los datos se muestra que los coeficientes globales de transferencia de calor calculados por el método de la zona no presentan variaciones considerables en los coeficientes de las muestras de un mismo material en sus tres espesores, es decir la muestras entre sí tienen una diferencia de 25 mm de espesor del aislante en poliuretano, fibra de vidrio o lana de roca cual sea el caso; lo que nos hace llegar a la conclusión que los resultados de su conductancia deberían tener una relación de proporcionalidad con las dimensiones del espesor, lo cual lo es evidente en los resultados del método de la caja caliente mientras que en el método de la zona aunque si hay variaciones en sus resultados son mínimas, y analizando esto notamos que en el método teórico al momento de realizar el cálculo de la zona A, solo tiene en cuenta la resistencia del material de mayor conductividad y en nuestro caso debido a la composición y diseño de las muestras esto deja anulado el posible efecto de la resistencia del aislante de esta zona ya que se desprecia y solo se tiene en cuenta el del acero que está presente en todas las secciones de la zona A debido a que el refuerzo es un apoyo vertical que une ambas placas de metal, lo que como consecuencia nos da de resultado que la

conductancia de la zona A de todas las muestras sea igual, solo variando la conductancia de la zona B.

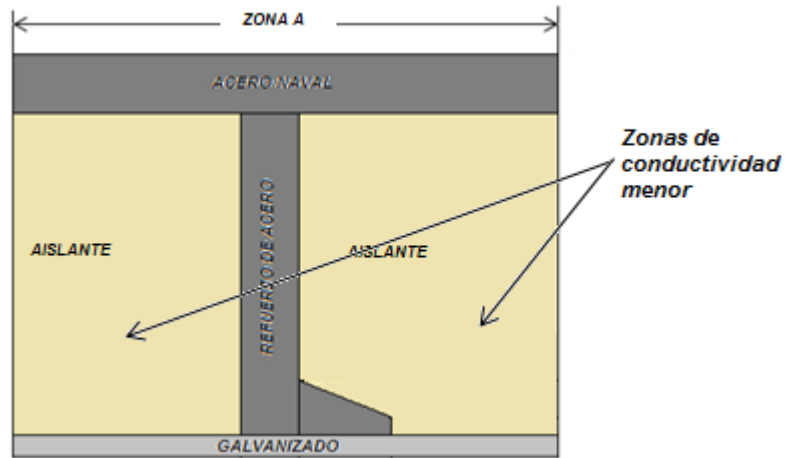


Figura 5. 4. Ilustración de áreas de menor conductividad, no tenidos en cuenta para el cálculo de la conductancia de la zona A

CONCLUSIONES

- Se determinaron coeficientes de transferencia de calor de los envolventes estudiados, válidos para su uso en la industria naval.
- La instalación de caja caliente de la UTB, se encuentra en óptimas condiciones para realizar tomas de datos y caracterizar térmicamente cualquier tipo de material homogéneo o no homogéneo, gracias a características tales como medición directa del flujo de calor.
- Las muestras que tiene mejor comportamiento como aislante térmico y cumplen con mayor eficacia su función, son las elaboradas con poliuretano, seguidas por las de lana de roca y por último de fibra de vidrio.
- Las medidas de espesores establecidos por la SNAME para cumplir con los requerimientos de valores de “U” máximos permitidos, son sobredimensionadas.
- Al realizar pruebas en una caja caliente es necesario tener alta precaución en la instrumentación utilizada principalmente los sensores de temperatura y flujo de calor ya que gracias a su naturaleza resulta muy fácil que se averíen y registren datos errados.
- El método teórico de La Zona, no es muy preciso y confiables para estructuras que tengan alto contenido de materiales con conductividad térmica elevada y perfiles que atraviesen todas las secciones de su area transversal, ya que el método de la zona realmente fue validado para estructuras que tuvieran cierto contenido de metal, a diferencia de nuestras muestras que en toda su área de transferencia de calor está compuesta por estos materiales.
- Es necesario realizar varias pruebas en una misma muestra para reducir el porcentaje de error, debido a que el equipo es muy sensible a los cambios climáticos exteriores y esto pueda afectar o variar los errores en alguna corrida en la toma de datos.

RECOMENDACIONES

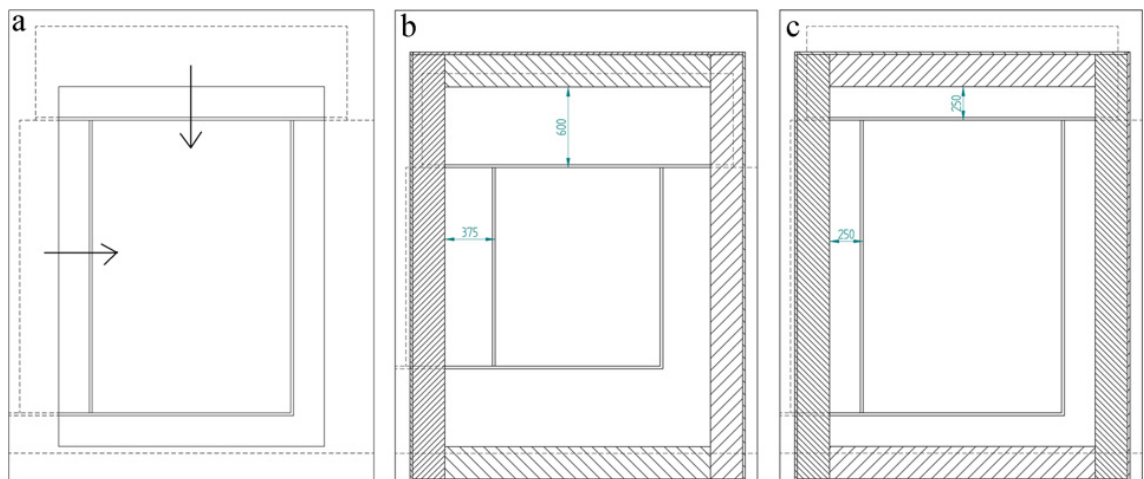
En base a la experiencia en la determinación de los coeficientes globales de transferencia de calor, plantearemos una serie de recomendaciones al equipo de caja caliente de la U.T.B. para aumentar su eficiencia y disminuir la incertidumbre de sus resultados.

Implementar sistema de rotación a la caja caliente

Como la norma lo sugiere es importante que la instalación de caja caliente cuente con un sistema de rotación el cual permita simular las condiciones reales de orientación del flujo de aire sobre las superficies, no en todos los casos el flujo de aire incide de igual forma, lo que puede causar variaciones en el flujo de calor que atraviesa la muestra.

- **Instalar panel central de muestras adaptable a diferentes tamaños.**

Para una mayor funcionalidad del equipo, es recomendado diseñar un panel en el cual se puedan montar diferentes tamaños de muestras, ya que con esto facilitaría el estudio a probetas de diferentes áreas, como sugerencia podría ser un panel con características parecidas al utilizado en la caja caliente de la universidad de Perugia en Italia, ilustrado en la figura 1.21.



Fuente: Artículo "Mediciones de transmitancia térmica con el método de la caja caliente: Calibración, procedimientos experimentales y análisis de incertidumbre de tres enfoques diferentes"

Figura 1. 25. (a, b, c). Panel central de muestras, diferentes configuraciones.

- **Recubrimiento al cableado de sensores**

Los sensores de temperaturas superficiales son sensores termocuplas tipo “K”, también conocidas como termocupla Chromel-Alumel, soportan temperaturas hasta de 1260 °C , funcionan en ambientes inerte y oxidantes, siendo muy efectivas, el inconveniente radica es en la naturaleza de las termocuplas ya que estas constan de dos metales diferentes, pero en un punto deben ser empalmadas con un conductor normal de cobre y debido a la resistencia del lado caliente ya que al producir un campo magnético induce la formación de corrientes parasitas lo cual afecta los valores registrados por lo cual se incrementan demasiado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE. 2001. ASHRAE Handbook - Fundamentals. Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE. 2005. ASHRAE Handbook - Fundamentals. Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Cengel, Yunus A., Transferencia de calor y masa un enfoque práctico, tercera edición, México D.F., edición McGraw-Hill interamericana, año 2007
- ASHRAE.1995. ASHRAE Handbook - Applications .Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Tesis de Grado. diseño de una instalación experimental tipo caja caliente para el estudio de las propiedades de transferencia de calor. Alfredo de Ávila .2009
- Gatland, S.D.; Goss, W.P.; and Curcija, D. 1997. "The Design and Calibration of a Research Hot Box." ASTM STP 1320 Insulation Materials: Testing and Applications. Vol. 3.Ottawa, CA
- Gatland, S.D.; Goss, W.P.; Baumgardner, R.L.; Williams, R.G.; and Miller, R.G. 1997. "A Wall and Edge Guarded Hot Box For Thermal Transmittance Measurements." ASTM STP 1320 Insulation Materials: Testing and Applications. Vol. 3.Ottawa, CA.
- Hart G., H., Fulton P. y Cox G. 2004."Ship Configurations: Insulation Design and Application" [en línea], disponible en: <http://www.sname.org/Libraries/ViewTechnicalPaper/?DocumentKey=4de87e86-1539-46f1-a6d0-68d48424804b>, recuperado el 14 de agosto de 2007.
- Journal of Testing and Evaluation (JTE) ASTM, Volume 15, Issue 3 (May 1987) . Measuring Thermal Performance of Wall Assemblies under Dynamic Temperature Conditions
- Journal of Testing and Evaluation (JTE) ASTM, Volume 15, Issue 3 (May 1987). Design and Calibration of a Guard Added to an Existing Hot Box
- Kosny, J and Childs P. 1990. Accuracy of Hot Box Testing of Steel Stud Walls. Insulation Material: Testing and Applications: 4th Volume. STP 1426.ASTM.

- Norma ASTM C1363 - 05. Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus
- Norma ISO 8990. Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal transmission properties -- Calibrated and guarded hot box
- Petrie, T.W., Kosny J., et al. 1990.Effect of Steel Framing in Attic/Ceiling Assemblies on Overall Thermal Resistance. Insulation Material: Testing and Applications: 4th Volume. STP 1426.ASTM.
- Rodríguez, C. M. 2006.Diagnóstico energético del sistema de aire acondicionado y refrigeración de un buque tipo nodriza fluvial. [Monografía de Grado]. Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena, Colombia.
- Rodríguez, C. M. 2008. Estudio comparativo del método de cálculo de carga térmica para sistemas de aire acondicionado en buques recomendado por la SNAME con el método CLTD/CLF de la ASHRAE. Revista Ciencia y tecnología de Buques. Cartagena, Colombia.
- Shah, Bipin and Dr. Dragan Curcija. 2000. A Pilot Project to Establish the Technical Basis and Institutional Framework for Assuring the Energy Efficiency of Fenestration Building Products in Certain Transitional Economy Countries. Technical Report. Center for Energy Efficiency and Renewable Energy
- SNAME .1980.Recommended Practices for Merchant Ship Heating, Ventilation and Air Conditioning Design Calculations. Technical and Research Bulletin 4-16.
- SNAME. 1963. Thermal Insulation Report. Technical and Research Bulletin 4-7. New York.

ANEXOS

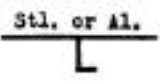
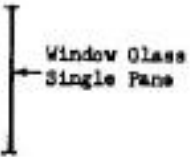

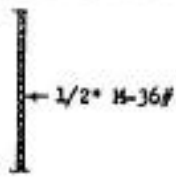

ANEXO A. Tablas reporte SNAME.

Anexo A1. Valores de "U" para espesores de 0 pulgadas de aislamiento.

60

Tabla 15.
 Values of "U"
 No Insulation.

O''

Type	Construction:	Condition:	↑ U	↔ R	↓ D			
0	 Stl. or Al.	S.	Solar Radiation.....	----	1.755	1.614		
			Weather Air to Inside Air...	1.491	1.320	1.206		
			Sea Water to Inside Air....	1.484	1.309	1.198		
			Inside Air to Inside Air...	1.113	.930	.801		
		W.	Inside Air to Weather Air..	1.644	1.390	1.224		
			Inside Air to Sea Water....	1.775	1.486	1.295		
		Inside Air to Inside Air...	.998	.833	.695			
	1	 Window Glass Single Pane	S.	Solar Radiation.....	See Note on page 8			
Inside Air to Inside Air...					.82			
W.			Inside Air to Weather Air..		1.13			
			Inside Air to Inside Air...		.75			
2	 Window Glass Thermo-Pane 1/2" Air Space	S.	Solar Radiation.....	See Note on page 8				
			Inside Air to Inside Air...		.53			
		W.	Inside Air to Weather Air..		.61			
			Inside Air to Inside Air...		.50			
3	 1/2" M-36#	S.	Inside Air to Inside Air...	.59	.50	.43		
			W.	Inside Air to Inside Air...	.55	.47	.39	
		4	 1/2" M-65#	S.	Inside Air to Inside Air...	.74	.61	.50
				W.	Inside Air to Inside Air...	.69	.56	.45

S = Cooling Season

W = Heating Season

Anexo A2. Valores de "U" para espesores de 1 pulgada de aislamiento.

Table 16

Values of "U"

1" Insulation



Type	Construction:	Condition:	↑ U	↔ H	↓ D	
20	<p>Stl. or Al. 1" Insulation</p>	S.	Solar Radiation.....	---	.500	.484
			Weather Air to Inside Air..	.480	.452	.429
			Sea Water to Inside Air....	---	.431	.413
			Inside Air to Inside Air...	.471	.434	.405
		W.	Inside Air to Weather Air..	.494	.446	.408
			Inside Air to Sea Water....	.491	.448	---
Inside Air to Inside Air...	.429		.389	.362		
21	<p>Stl. or Al. 1" Insulation</p>	S.	Solar Radiation.....	---	.365	.357
			Weather Air to Inside Air..	.345	.340	.330
			Sea Water to Inside Air....	---	.333	.326
			Inside Air to Inside Air...	.329	.316	.300
		W.	Inside Air to Weather Air..	.334	.318	.301
			Inside Air to Sea Water....	.344	.330	---
Inside Air to Inside Air...	.301		.283	.271		
22	<p>Stl. or Al. 1" Insulation</p>	S.	Solar Radiation.....	---	.243	.245
			Weather Air to Inside Air..	.225	.229	.227
			Sea Water to Inside Air....	---	.229	.228
			Inside Air to Inside Air...	.211	.207	.199
		W.	Inside Air to Weather Air..	.210	.206	.198
			Inside Air to Sea Water....	.220	.217	---
Inside Air to Inside Air...	.192		.183	.179		
23	<p>1" Insulation Stl. or Al. Channel Furring S.M. Lining</p>	S.	Solar Radiation.....	---	.359	.317
			Weather Air to Inside Air..	.351	.320	.266
			Sea Water to Inside Air....	---	.298	.257
			Inside Air to Inside Air...	.359	.323	.273
		W.	Inside Air to Weather Air..	.360	.334	.277
			Inside Air to Sea Water....	.374	.331	---
Inside Air to Inside Air...	.324		.287	.240		
24	<p>1" Insulation Stl. or Al. 1" Channel Furring S.M. Lining</p>	S.	Solar Radiation.....	---	.284	.257
			Weather Air to Inside Air..	.273	.260	.224
			Sea Water to Inside Air....	---	.248	.221
			Inside Air to Inside Air...	.270	.253	.221
		W.	Inside Air to Weather Air..	.278	.257	.223
			Inside Air to Sea Water....	.282	.262	---
Inside Air to Inside Air...	.245		.225	.197		

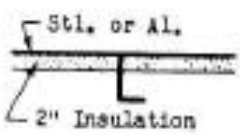
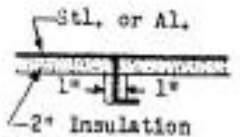
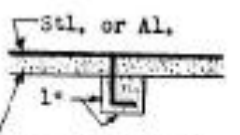
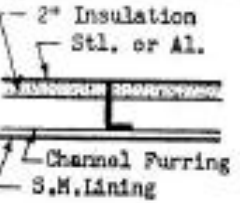
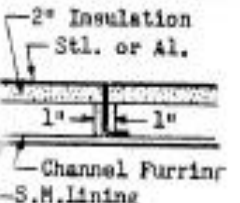
S - Cooling Season

W - Heating Season

Anexo A3. Valores de "U" para espesores de 2 pulgadas de aislamiento.

Table 17.
Values of "U"
2" Insulation

2"

Type:	Construction:	Conditions:	↑ U	↔ H	↓ D	
50.		S.	Solar Radiation.....	----	.360	.347
			Weather Air to Inside Air..	.349	.327	.308
			Sea Water to Inside Air....	----	.308	.296
		W.	Inside Air to Inside Air...	.352	.322	.302
			Inside Air to Weather Air..	.364	.326	.299
			Inside Air to Sea Water....	.363	.325	----
51.		S.	Solar Radiation.....	----	.259	.255
			Weather Air to Inside Air..	.247	.242	.235
			Sea Water to Inside Air....	----	.236	.231
		W.	Inside Air to Inside Air...	.245	.232	.222
			Inside Air to Weather Air..	.244	.231	.219
			Inside Air to Sea Water....	.249	.236	----
52.		S.	Solar Radiation.....	----	.154	.155
			Weather Air to Inside Air..	.145	.147	.147
			Sea Water to Inside Air....	----	.147	.147
		W.	Inside Air to Inside Air...	.139	.137	.133
			Inside Air to Weather Air..	.134	.131	.129
			Inside Air to Sea Water....	.140	.136	----
53.		S.	Solar Radiation.....	----	.277	.237
			Weather Air to Inside Air..	.274	.249	.214
			Sea Water to Inside Air....	----	.231	.207
		W.	Inside Air to Inside Air...	.280	.250	.212
			Inside Air to Weather Air..	.292	.257	.210
			Inside Air to Sea Water....	.288	.253	----
54.		S.	Solar Radiation.....	----	.212	.169
			Weather Air to Inside Air..	.206	.196	.176
			Sea Water to Inside Air....	----	.187	.172
		W.	Inside Air to Inside Air...	.207	.191	.169
			Inside Air to Weather Air..	.208	.193	.166
			Inside Air to Sea Water....	.210	.195	----
		Inside Air to Inside Air...	.190	.175	.151	

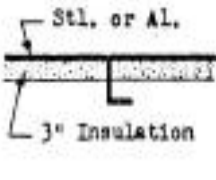
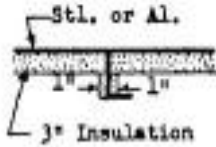
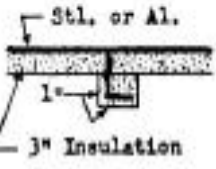
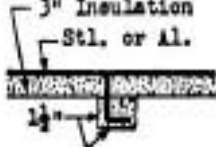
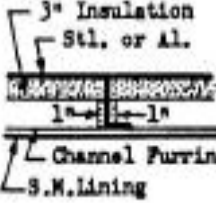
S = Cooling Season

W = Heating Season

Anexo A4. Valores de "U" para espesores de 3 pulgadas de aislamiento.

Table 18.
Values of "U"
3" Insulation

3"

Type	Construction:	Condition:	↑ U	↔ H	↓ D		
90.	 <p>Stl. or Al. 3" Insulation</p>	S.	Solar Radiation.....	----	.287	.274	
			Weather Air to Inside Air..	.278	.260	.245	
			Sea Water to Inside Air....	----	.245	.235	
		W.	Inside Air to Inside Air...	.282	.259	.243	
			Inside Air to Weather Air..	.293	.259	.238	
			Inside Air to Sea Water....	.290	.257	----	
W.	Inside Air to Inside Air...	.260	.236	.219			
	91.	 <p>Stl. or Al. 1" 1" 3" Insulation</p>	S.	Solar Radiation.....	----	.209	.204
				Weather Air to Inside Air..	.201	.194	.188
Sea Water to Inside Air....				----	.194	.184	
W.			Inside Air to Inside Air...	.201	.192	.182	
			Inside Air to Weather Air..	.204	.191	.180	
			Inside Air to Sea Water....	.209	.195	----	
W.	Inside Air to Inside Air...	.189	.177	.168			
	92.	 <p>Stl. or Al. 1" 1" 3" Insulation</p>	S.	Solar Radiation.....	----	.116	.117
				Weather Air to Inside Air..	.109	.111	.111
Sea Water to Inside Air....				----	.111	.111	
W.			Inside Air to Inside Air...	.105	.105	.102	
			Inside Air to Weather Air..	.101	.099	.097	
			Inside Air to Sea Water....	.106	.104	----	
W.	Inside Air to Inside Air...	.094	.094	.092			
	93.	 <p>3" Insulation Stl. or Al. 1" 1" 3" Insulation</p>	S.	Solar Radiation.....	----	.100	.101
				Weather Air to Inside Air..	.097	.097	.096
Sea Water to Inside Air....				----	.097	.096	
W.			Inside Air to Inside Air...	.094	.093	.090	
			Inside Air to Weather Air..	.088	.086	.084	
			Inside Air to Sea Water....	.092	.090	----	
W.	Inside Air to Inside Air...	.084	.084	.081			
	94.	 <p>3" Insulation Stl. or Al. 1" 1" Channel Furring S.M. Lining</p>	S.	Solar Radiation.....	----	.178	.150
				Weather Air to Inside Air..	.180	.157	.144
Sea Water to Inside Air....				----	.152	.142	
W.			Inside Air to Inside Air...	.171	.158	.144	
			Inside Air to Weather Air..	.170	.156	.150	
			Inside Air to Sea Water....	.171	.157	----	
W.	Inside Air to Inside Air...	.157	.144	.128			

S = Cooling Season

W = Heating Season