

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE  
MATERIALES CONSTRUCTIVOS USADOS COMÚNMENTE EN COLOMBIA  
PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ENVOLVENTES DE EDIFICACIONES**

**ING. EDUARDO ADOLFO VELEZ PAREJA**

**UNIVERSIDAD DEL NORTE  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA  
BARRANQUILLA  
2014**

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE  
MATERIALES CONSTRUCTIVOS USADOS COMÚNMENTE EN COLOMBIA  
PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ENVOLVENTES DE EDIFICACIONES**

**ING. EDUARDO ADOLFO VELEZ PAREJA**

**Monografía presentada como requisito para optar al título de Magíster en  
Ingeniería Mecánica**

**DIRECTOR:  
ING. ANTONIO BULA SILVERA, Ph. D**

**UNIVERSIDAD DEL NORTE  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA  
BARRANQUILLA  
2014**

Aprobado por la División de Ingenierías  
en cumplimiento de los requisitos  
exigidos para otorgar el título de  
Magíster en Ingeniería Mecánica.

---

Director del Proyecto

---

Miembro de Comité

---

Miembro de Comité

---

Miembro de Comité

*Dedicatoria:*

*A ti mi Dios por estar siempre a mi lado, a mi familia por ser un apoyo incondicional y a mi madre por su empeño y apoyo constante en cada meta que me he propuesto.*

## AGRADECIMIENTOS

Te agradezco a ti señor por ser la fuerza que me ha permitido seguir adelante en cada reto que me he propuesto en mi vida, gracias por acompañarme en este camino y por permitirme encontrar personas que me han aportado a nivel personal y profesional.

Gracias a mi familia por su apoyo incondicional, por estar día a día apoyándome, aconsejándome y por respaldarme en cada decisión que he tomado; gracias mamá por ser un motor en mi vida y por estar en los momentos difíciles y gratos dándome tu voz de apoyo.

A mi UNIVERSIDAD DEL NORTE la cual me ha permitido formarme como profesional en mis estudios de pregrado y posgrado de forma satisfactoria.

A mi director de tesis, el profe Antonio, por brindarme la confianza y la oportunidad de trabajar junto a él, por cada consejo y cada enseñanza dada, por su esfuerzo y dedicación la cual me ha permitido culminar mis estudios.

Al Arquitecto Fabián, por darme la confianza de trabajar estos dos años en un proyecto innovador, por su gran dedicación a este gran proyecto y por cada aporte realizado al desarrollo de esta tesis.

Al profe Marco por su motivación y apoyo en todas las etapas de esta tesis, y por su confianza al hacerme parte de un excelente grupo de trabajo.

A mis grandes amigos Andreiña e Iván con los cuales comencé este camino desde el pregrado, sin ustedes este proceso no hubiese sido lo mismo, gracias por cada momento de lucha y por darme su fortaleza cada vez que he necesitado.

A mi amigo Horacio, el aporte que realizaste a esta tesis fue esencial, gracias por tu ayuda incondicional.

A la familia del Departamento de Ingeniería Mecánica por sus ánimos y consejos desde el inicio de esta etapa. A mis amigos de la “salita” y lucecita, los cuales han realizados aportes importantes en este documento y me han dado grandes enseñanzas con el día a día.

Gracias a todas las personas que han aportado a mi vida personal y profesional, cada recuerdo que tengo es de pleno agradecimiento, que Dios los bendiga.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Tabla de contenido.....</b>	<b>VII</b>
<b>Listas de tablas .....</b>	<b>X</b>
<b>Listas de figuras .....</b>	<b>XI</b>
<b>Listas de anexos .....</b>	<b>XVII</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>18</b>
<b>Nomenclatura .....</b>	<b>19</b>
<b>1 Introducción .....</b>	<b>21</b>
1.1 Planteamiento del problema e hipótesis .....	21
1.2 Justificación .....	22
1.3 Objetivos .....	24
1.3.1 Objetivo general.....	24
1.3.2 Objetivos específicos .....	24
1.4 Metodología de la investigación .....	25
1.5 Contribuciones.....	26
1.6 Antecedentes.....	28
1.7 Estado del arte .....	29
1.7.1 Edificios de cero consumo (zeb) .....	29
1.7.2 Tecnología de generación y reducción de consumo de energía en edificaciones .....	32
1.7.2.1 Tecnologías de generación de energía .....	32
1.7.2.2 Modificaciones a construcciones existentes .....	33
1.7.3 Metodologías y tecnologías de análisis energético de edificaciones ....	33
1.7.3.1 Software .....	33
1.7.3.2 Metodologías de evaluación energética en edificaciones.....	34
1.7.4 Envolventes y materiales en edificaciones.....	34
1.7.5 Tecnologías existentes para la caracterización térmica de materiales constructivos .....	37
1.7.5.1 Conductividad térmica .....	37
1.7.5.1.1 Técnicas en estado estable .....	38
1.7.5.1.2 Técnicas en transitorio.....	39
1.7.5.1.3 Características de los métodos de mediciones actuales .....	41
1.7.5.2 Capacidad térmica.....	42
1.7.5.3 Difusividad térmica .....	43
1.7.5.4 Emisividad .....	43
1.7.5.4.1 Métodos de medición.....	43
1.8 Organización del documento .....	44
<b>2 Identificación y selección de métodos de medición.....</b>	<b>46</b>
2.1 Introducción .....	46
2.2 Ecuaciones de gobierno .....	46

2.2.1	Densidad aparente.....	47
2.2.2	Densidad por área lateral.....	47
2.2.3	Masa del material constructivo.....	47
2.2.4	Masa de agua .....	48
2.2.5	Conductividad térmica.....	48
2.2.5.1	Método 1.....	49
2.2.5.1.1	Diseño de equipo para evaluación térmica de materiales de construcción .....	50
2.2.5.1.2	Corrección del valor de conductividad térmica- método 1 .....	63
2.2.5.2	Método 2.....	68
2.2.5.3	Prueba piloto.....	70
2.2.5.3.1	Método 1.....	70
2.2.5.3.2	Método 2.....	73
2.2.6	Resistencia térmica.....	75
2.2.7	Calor específico .....	75
2.2.7.1	Metodo1.....	76
2.2.7.2	Método 2.....	77
2.2.7.3	Método 3.....	79
2.2.7.3.1	Prueba piloto .....	79
2.2.8	Difusividad térmica.....	83
2.2.9	Emisividad.....	83
2.2.9.1	Método 1- medición comparativa con un termómetro de contacto. ...	84
2.2.9.2	Método 2- medición comparativa con la cámara misma. ....	84
2.2.9.2.1	Prueba piloto .....	84
<b>3</b>	<b>Caracterizaciones metrológicas de metodos seleccionados .....</b>	<b>87</b>
3.1	Propagación del error .....	88
3.1.1	Densidad aparente.....	88
3.1.2	Densidad por área .....	88
3.1.3	Masa .....	89
3.1.4	Masa de agua .....	89
3.1.5	Conductividad térmica.....	89
3.1.6	Calor específico .....	91
3.1.7	Difusividad térmica.....	92
3.2	Análisis de capacidad de mediciones.....	92
3.2.1	Conductividad térmica.....	92
3.2.2	Calor específico .....	102
3.2.3	Difusividad térmica.....	103
3.2.4	Emisividad.....	104
3.3	Atributos metrológicos .....	104
3.3.1	Conductividad térmica.....	105
3.3.2	Calor específico .....	106



3.3.3	Emisividad.....	107
3.4	Validación de mediciones.....	109
3.4.1	Conductividad térmica.....	109
3.4.2	Calor específico .....	112
3.4.3	Emisividad.....	112
<b>4</b>	<b>Medición de propiedades de materiales constructivos.....</b>	<b>114</b>
4.1	Identificación de materiales constructivos tradicionales .....	114
4.2	Resultados de experimentación .....	117
4.3	Diseño de experimento.....	124
4.3.1	Factor de diseño .....	124
4.3.2	Variable de respuesta .....	125
4.3.3	Variable con variación permitida .....	125
4.3.4	Diseño de experimento .....	125
<b>5</b>	<b>Discusión de resultados .....</b>	<b>127</b>
<b>6</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>130</b>
<b>7</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>131</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>136</b>

## LISTAS DE TABLAS

Tabla 1 Técnicas de medición de conductividad térmica en estado estable .....	39
Tabla 2 Técnicas de medición de conductividad térmica en estado transitorio .....	40
Tabla 3 Técnicas en estado transitorio tipo óptico para medición de conductividad térmica. ....	41
Tabla 4 Resultados de prueba piloto para medición de emisividad aplicando el método 2 .....	85
Tabla 5 Valores de conductividad térmica del mortero, para medición de precisión del equipo de conductividad térmica.....	105
Tabla 6 Valores de calor específico obtenidos del A36.....	107
Tabla 7 Valores de emisividad obtenidos.....	108
Tabla 8 Densidad y conductividad térmica a 0 °C del aislante de fibra de vidrio .....	109
Tabla 9 Materiales constructivos tradicionales de Colombia seleccionados.....	115
Tabla 10 Resultado de prueba de calor específico del bloque liso .....	120
Tabla 11 Resultados de prueba de emisividad del bloque liso .....	121
Tabla 12 Secuencia de experimentación.....	125
Tabla 13 Resultados de pruebas de experimento.....	125
Tabla 14 Tabla ANOVA de experimento.....	126
Tabla 15 Resultados de prueba alterna de medición de conductividad térmica de fibra de vidrio	179

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 Diseño conceptual de equipo de medición de conductividad térmica .....	49
Figura 2 Pérdida de calor esperada del equipo de medición de conductividad térmica .....	50
Figura 3 Configuración de equipo de medición de conductividad térmica en funcionamiento .....	51
Figura 4 Diseño inicial del equipo de medición de conductividad térmica.....	55
Figura 5 Equipo de medición de conductividad térmica fabricado.....	55
Figura 6 Circuito de conmutación de relés, para control de potencia disipada del equipo de medición de conductividad térmica.....	57
Figura 7 Diseño del circuito impreso en Eagle del equipo de medición de conductividad térmica .	58
Figura 8 Circuito esquemático de regulación de voltaje del equipo de medición de conductividad térmica .....	59
Figura 9 Circuito impreso de regulación de voltaje del equipo de medición de conductividad térmica. ....	59
Figura 10 Esquema P&ID del equipo de medición de conductividad térmica .....	60
Figura 11 Perfil de potencia disipada por la resistencia del equipo de medición de conductividad térmica .....	61
Figura 12 Aproximación en diferencias finitas del material constructivo.....	62
Figura 13 Comportamiento de la Temperatura Inferior y Superior para las entradas de potencia del equipo de medición de conductividad térmica.....	63
Figura 14 Modelo de resistencia térmica del equipo de medición de conductividad térmica.....	64
Figura 15 Porcentaje de calor transferido al material constructivo .....	66
Figura 16 Corrección del valor de conductividad térmica dado por el equipo de medición de conductividad térmica.....	68
Figura 17 Distribución de sensores de temperatura en método 2 para medición de conductividad térmica .....	69
Figura 18 Promedio de temperatura realizado en análisis del método 2 para medición de conductividad térmica.....	70
Figura 19 Pieza de poliestireno para prueba piloto del método 1.....	71
Figura 20 Comportamiento de la temperatura inferior y superior del material evaluado usando el método 1 .....	71
Figura 21 Comportamiento de la potencia disipada en prueba piloto del método 1 .....	72
Figura 22 Comportamiento de la conductividad térmica del poliestireno utilizando el método 1..	72
Figura 23 Adecuación de recipiente en el método 2 .....	73
Figura 24 Comportamiento del promedio de la temperatura interna y externa del recipiente usando el método 2 .....	74
Figura 25 Comportamiento de la diferencia de temperatura entre las dos superficies del recipiente usando el método 2 .....	74
Figura 26 Comportamiento de la conductividad térmica del poliestireno por el método 2 .....	75
Figura 27 Esquema de prueba para determinar calor específico, método 1.....	76
Figura 28 Aproximación en diferencias finitas para determinar calor específico, método 2 .....	78

Figura 29 Pasos para medición de calor específico usando el método 1.....	80
Figura 30 Distribución de temperatura en las superficies bajo potencia constante usando el método 2.....	81
Figura 31 Comportamiento del calor específico del poliestireno expandido aplicando el método 281	
Figura 32 Montaje para medición de calor específico usando el método 3.....	82
Figura 33 Comportamiento del aire interno del calorímetro .....	82
Figura 34 Cámara termográfica.....	84
Figura 35 Configuración para medición de emisividad aplicando el método 2 .....	85
Figura 36 Espacio de aire entre placa y material del equipo de conductividad térmica .....	93
Figura 37 Circuito de resistencia térmica del equipo de medición de conductividad térmica.....	93
Figura 38 Espesor mínimo del material constructivo en función de la conductividad térmica para medición adecuada del equipo de conductividad térmica .....	98
Figura 39 Circuito de resistencia térmica del equipo de medición de conductividad térmica.....	99
Figura 40 Espesor máximo del material constructivo en función de la conductividad térmica para medición adecuada del equipo de conductividad térmica .....	101
Figura 41 – Muestra de mortero para medición de precisión del equipo de conductividad térmica .....	105
Figura 42 –Secuencia de tiempo para valores de conductividad térmica obtenidos .....	106
Figura 43 Muestra de acero A36 para medición de la precisión del método de medición de calor específico.....	106
Figura 44 Secuencia de tiempo para valores de calor específico obtenidos .....	107
Figura 45 Muestra de acero oxidado para medición de precisión de emisividad .....	108
Figura 46 Secuencia de tiempo para los valores de emisividad obtenidos .....	108
Figura 47 Temperatura inferior y superior del poliestireno en prueba de medición de conductividad térmica.....	110
Figura 48 Comportamiento de la potencia suministrada a muestra de poliestireno en prueba de medición de conductividad térmica.....	110
Figura 49 Comportamiento de la conductividad térmica del poliestireno .....	111
Figura 50 Diagrama de caja para los valores obtenidos en la medición de calor específico del ASTM A36 .....	112
Figura 51 Diagrama de caja para los valores obtenidos en la medición de emisividad del ASTM A36 .....	113
Figura 52 Bloque Liso de 0.09x0.19x0.39 m.....	117
Figura 53 a) Masa del material bloque liso en condiciones de equilibrio de humedad b) Masa del material de bloque liso luego del proceso de secado.....	118
Figura 54 Comportamiento de temperaturas inferior y superior del bloque liso en la prueba de conductividad térmica.....	119
Figura 55 Comportamiento de la conductividad térmica del bloque liso en la prueba de conductividad térmica.....	119
Figura 56 Comportamiento de la conductividad térmica del bloque liso en la prueba de conductividad térmica.....	120
Figura 57 Configuración de materiales en prueba de emisividad.....	121

Figura 58 Gráficos de independencia y probabilidad normal de experimento .....	126
Figura 59 Valor de propiedades térmicas de conjuntos constructivos aceptados por la ASHRAE .	127
Figura 60 Comparación de materiales constructivos propios con elementos internacionales .....	129
Figura 61 Contenido de carpeta de ejecución de equipo de conductividad.....	143
Figura 62 Paso 1 para ejecución del software de medición de conductividad .....	143
Figura 63 Paso 2, abrir archivo de medición de temperatura.....	144
Figura 64 Escenario del programa step 7.....	144
Figura 65 Identificación de señales de temperatura.....	145
Figura 66 Programa de adquisición de señales de temperatura en Step 7 .....	145
Figura 67 Conexión de puerto serial de tarjeta de adquisición de datos .....	146
Figura 68 Subrutina completa de adquisición de señales de temperatura .....	146
Figura 69 Verificación de estado del PLC .....	147
Figura 70 Secuencia de ejecución de programa en step 7.....	147
Figura 71 Botón ejecución de programa .....	148
Figura 72 Visualización de la ejecución de programa .....	148
Figura 73 Activación de operadores.....	148
Figura 74 Ejecución de labview .....	148
Figura 75 Ejecución de programa principal.....	149
Figura 76 Ventana principal Programa Labview.....	149
Figura 77 Ejecución de programa.....	149
Figura 78 Partes de la ventana principal .....	150
Figura 79 Botón para guardar datos .....	150
Figura 80 Botón para habilitar el panel operativo .....	150
Figura 81 Panel operativo de labview .....	151
Figura 82 Visualizador de temperaturas y de estados de funcionamiento del panel.....	151
Figura 83 a) Visualizador de voltaje y corriente, b) Calculadora de corriente requerida, c) Habilitar etapa de calentamiento, d) Panel de control.....	152
Figura 84 a) Condición de temperaturas, b) Temperaturas inferior y superior, c) Distribución de temperatura, d) Visualizados analógico de temperaturas promediadas y de propiedad medida .	152
Figura 85 Pasos para ubicación de la muestra en equipo de medición de conductividad térmica	153
Figura 86 Interruptor de pre-calentamiento.....	153
Figura 87 Botón de inicio de programa Labview.....	154
Figura 88 Estabilización de temperaturas al inicio de la prueba .....	154
Figura 89 Visualización de estabilización de temperatura.....	154
Figura 90 Inicio del pre-calentamiento .....	155
Figura 91 Etapa de pre-calentamiento del equipo de conductividad térmica.....	155
Figura 92 Panel de control del software para medición de conductividad térmica .....	155
Figura 93 Fuente para suministro de potencia a la resistencia térmica .....	156
Figura 94 Funcionamiento del PWM.....	156
Figura 95 Estabilización de temperaturas monitoreadas .....	156
Figura 96 Guardar datos obtenidos en prueba .....	156
Figura 97 Plano del ladrillo #3.....	158

Figura 98 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del ladrillo #3.....	158
Figura 99 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del ladrillo #3.....	158
Figura 100 Conductividad térmica del ladrillo #3 .....	158
Figura 101 Plano del Ladrillo #6.....	159
Figura 102 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del ladrillo #6.....	159
Figura 103 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del ladrillo #6.....	159
Figura 104 Conductividad térmica del ladrillo #6 .....	159
Figura 105 Plano del ladrillo común.....	160
Figura 106 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del ladrillo común.....	160
Figura 107 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del ladrillo común .....	160
Figura 108 Conductividad térmica del ladrillo común .....	160
Figura 109 Plano tolete macizo #3 .....	161
Figura 110 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del tolete macizo #3 .....	161
Figura 111 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del tolete macizo #3.....	161
Figura 112 Conductividad térmica del tolete macizo #3.....	161
Figura 113 Plano del bocadillo de enchape .....	162
Figura 114 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bocadillo de enchape, configuración 1 .....	162
Figura 115 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bocadillo de enchape, configuración 1 .....	162
Figura 116 Conductividad térmica del bocadillo de enchape, configuración 1 .....	162
Figura 117 Plano del bocadillo de enchape .....	163
Figura 118 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bocadillo de enchape, configuración 2 .....	163
Figura 119 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bocadillo de enchape, configuración 2 .....	163
Figura 120 Conductividad térmica del bocadillo de enchape, configuración 2 .....	163
Figura 121 Plano del tolete #2 .....	164
Figura 122 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del tolete #2 , configuración 1.....	164
Figura 123 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del tolete #2 , configuración 1 .....	164
Figura 124 Conductividad térmica del tolete #2, configuración 1 .....	164
Figura 125 Plano de tolete #2 .....	165

Figura 126 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del tolete #2 , configuración 2 .....	165
Figura 127 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del tolete #2 , configuración 2 .....	165
Figura 128 Conductividad térmica del tolete #2 .....	165
Figura 129 Plano del prensado liviano .....	166
Figura 130 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del prensado liviano .....	166
Figura 131 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del prensado liviano .....	166
Figura 132 Conductividad térmica del prensado liviano .....	166
Figura 133 Plano de tolete #3 .....	167
Figura 134 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del tolete #3 .....	167
Figura 135 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del tolete #3 .....	167
Figura 136 Conductividad térmica del tolete #3 .....	167
Figura 137 Plano del tolete #1 .....	168
Figura 138 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del tolete #1 .....	168
Figura 139 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del tolete #1 .....	168
Figura 140 Conductividad térmica del tolete #1 .....	168
Figura 141 Plano de bloque de cemento .....	169
Figura 142 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque de cemento .....	169
Figura 143 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque de cemento .....	169
Figura 144 Conductividad térmica del bloque de cemento .....	169
Figura 145 Plano de bloque de cemento prensado .....	170
Figura 146 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque de cemento prensado .....	170
Figura 147 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque de cemento prensado .....	170
Figura 148 Conductividad térmica del bloque de cemento prensado .....	170
Figura 149 Plano de bloque split .....	171
Figura 150 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque split .....	171
Figura 151 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque split .....	171
Figura 152 Conductividad térmica del bloque split .....	171
Figura 153 Plano de bloque liso .....	172

Figura 154 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque liso .....	172
Figura 155 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque liso .....	172
Figura 156 Conductividad térmica de bloque liso.....	172
Figura 157 Plano de bloque liso estructural.....	173
Figura 158 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque liso estructural.....	173
Figura 159 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque liso estructural .....	173
Figura 160 Conductividad térmica de bloque liso estructural .....	173
Figura 161 Plano de bloque liso #10 .....	174
Figura 162 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque liso #10 .....	174
Figura 163 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque liso #10 .....	174
Figura 164 Conductividad térmica de bloque liso #10.....	174
Figura 165 Plano de bloque liso # 15 .....	175
Figura 166 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque liso #15 .....	175
Figura 167 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque liso #15 .....	175
Figura 168 Conductividad térmica de bloque liso #15.....	175
Figura 169 Muestra de fibra de vidrio.....	176
Figura 170 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica de fibra de vidrio .....	176
Figura 171 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica de fibra de vidrio .....	176
Figura 172 Conductividad térmica de fibra de vidrio.....	176
Figura 173 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica de poliestireno expandido, tipo I .....	177
Figura 174 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica de poliestireno expandido, tipo I .....	177
Figura 175 Conductividad térmica de poliestireno expandido, tipo I.....	177
Figura 176 Poliestireno expandido 2.....	178
Figura 177 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica de poliestireno expandido, tipo II .....	178
Figura 178 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica de poliestireno expandido, tipo II .....	178
Figura 179 Conductividad térmica poliestireno expandido, tipo II.....	178



## LISTAS DE ANEXOS

Anexo a- Funcionamiento de la interfaz gráfica del sistema de control del equipo de medición de conductividad térmica. ....	136
Anexo b- Pruebas de conductividad térmica .....	157
Anexo c- Prueba alterna de conductividad térmica para aislantes .....	179
Anexo d- Pruebas de calor específico .....	180
Anexo e- Pruebas de emisividad.....	182
Anexo f- Índice de materiales identificado por la ashrae .....	187
Anexo g- Planos de equipo de medición de conductividad térmica.....	189

## RESUMEN

*El comportamiento térmico de los materiales constructivos utilizados en Colombia no se encuentra caracterizado actualmente, lo cual es esencial para obtener las bases necesarias para un diseño arquitectónico fundamentado en eficiencia energética. La determinación de propiedades térmicas y la obtención de evaluaciones del desempeño térmico y energético de los materiales constructivos usados comúnmente en el país, son los principales retos que esta investigación aborda. La metodología planteada implica la construcción de modelos de transferencia de calor a través de diferentes medios y geometrías, el diseño y construcción de una plataforma propia de caracterización de materiales y configuraciones en construcciones, donde se llevarán a cabo los ensayos requeridos.*

*Obteniendo información relevante para desarrollar por parte del gobierno estándares de calidad energética de los materiales constructivos, e incentivar las políticas nacionales de construcciones sostenibles consignadas en el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 y 2015-2019.; y por parte de entidades del sector privado como el Consejo Colombiano de Construcciones Sostenibles (CCCS) y la Asociación Colombiana del acondicionamiento del aire y Refrigeración (acaire), fortalecer el Sello Ambiental para Edificaciones Sostenibles y El reglamento de instalaciones térmicas en edificaciones (RITE) respectivamente.*

*De los 17 materiales constructivos evaluados 4 poseen una resistencia térmica mayor a la mínima tabulada por la AHSRAE para elementos constructivos, además se evidencia que se debe dar un proceso de estandarización en los procesos de fabricación de los componentes para envolventes desde el punto de vista térmico.*

## NOMENCLATURA

<i>Ais</i>	Aislante
amb	ambiente
A	Amperio
A	área
C	Calor específico
cm	centímetros
h	Coefficiente convectivo
cond	conducción
<i>k</i>	Conductividad
TC	Controlador de temperatura
conv	convección
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
I	corriente
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
$\rho$	Densidad
$\alpha$	Difusividad
<i>el</i>	Elemento
$\varepsilon$	Emisividad
$\Delta R$	Error absoluto
$\Delta r$	Error asociado
Ext	exterior
°C	Grados centígrados
i	inicial
<i>Inf</i>	Inferior
int	interior
K	Kelvin
kg	kilogramos
<i>m</i>	masa
mat	material
m	metro
PWM	Modulador por ancho de pulso
L	Longitud
$\Omega$	Ohmio
$\dot{Q}$	Potencia
%R	Porcentaje de resistencia
$\bar{T}$	Porcentaje de tiempo
Pract	Práctica
Rad	Radiación
R	Resistencia
$R_T$	Resistencia total
s	superficial
<i>Sup</i>	Superior

DAQ	Tarjeta de adquisición de datos
T	Temperatura
<i>t</i>	Tiempo
TT	Transmisor de temperatura
$k^{\pm}$	Variación de la conductividad
w	vatio
<i>v</i>	voltaje
V	Volumen
ZEB	Zero Energy Building

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA E HIPÓTESIS

En condiciones climáticas tropicales el sistema de acondicionamiento de aire es esencial para mantener un buen ambiente térmico para los ocupantes, frecuentemente este sistema representa entre 30-60% del consumo de energía total de la edificación, mientras que la iluminación artificial ocupa el segundo lugar en cuanto a consumo de energía representando entre el 15-20% de la energía total consumida [1][2][3]. Por tal motivo el sistema de acondicionamiento de aire es visto como un potencial candidato para mejorar la eficiencia energética de una edificación [4], razón por la cual en este trabajo se busca enfatizar en indicadores que ayuden a disminuir el consumo energético de estos sistemas.

La energía necesaria para acondicionar una edificación por calefacción y refrigeración depende principalmente de la ganancia o pérdida de calor de la edificación, mientras mayor sea la ganancia o pérdida de calor mayor es el consumo de los equipos de refrigeración y calefacción necesarios para mantener las condiciones de confort en el interior de la edificación durante su fase operativa respectivamente. Las envolventes de las edificaciones con baja conductividad térmica y capacidad calorífica adecuada resultan en una ganancia de calor baja y controlada, por ende para reducir la demanda de energía de las edificaciones por acondicionamiento de aire es necesario el uso de materiales o capas de materiales en la construcción de envolventes del edificio con estas características[5].

La preocupación por reducir el consumo energético en las edificaciones ha permitido que en países desarrollados el sector de la construcción se disponga de un amplio conocimiento de los valores de resistencia térmica de los materiales constructivos y de la influencia de considerar el efecto de aislamiento térmico, lo cual ha permitido desarrollar políticas de regulación energética para las edificaciones. Por el contrario en países ubicados en zonas de clima tropical húmedo como Colombia se ha dificultado la inclusión de políticas fuertes que

conlleven a ahorros energéticos debido a la escases de investigaciones en el tema[6].

Esta tesis responde el interrogante **¿Cuáles son los valores de las propiedades térmicas de los materiales constructivos usados comúnmente en Colombia para el diseño de envolventes de edificaciones en zonas rurales y urbanas?**

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

El programa de Uso Racional y Eficiente de Energía PROURE, prioriza las estrategias, subprogramas y líneas de acción y las enfoca fundamentalmente hacia la disminución de la intensidad energética y al mejoramiento de la eficiencia energética de los sectores de consumo para mejorar la calidad de vida de la ciudadanía, cumpliendo con los niveles mínimos de eficiencia dispuestos por las normatividades existentes[7].

El programa ha adoptado como referente inicial en el *Plan de acción indicativo 2015 visión al 2019* alcanzar ahorros energéticos en el sector Residencial y Comercial del 8.66% y 2.66% respectivamente[8]. Para esto ha definido Subprogramas prioritarios en los sectores de consumo. El *sector residencial* posee 5 subprogramas, donde se destacan tres, de los cuales dos tienen prioridad ALTA: *Sustitución de Bombillas y Uso eficiente de energía y equipos de refrigeración y aires condicionados domésticos*, y un subprograma de prioridad MEDIA que está encaminado al diseño, construcción y uso eficiente y sostenible de viviendas, el cual busca desarrollar normatividad en eficiencia energética en VIS y edificaciones, desarrollando sistemas de arquitectura pasiva con conceptos de eficiencia energética, promoviendo la investigación de sistemas de construcción, diseños arquitectónicos y nuevos materiales constructivos, añadiendo que el subprograma correspondiente al *sector comercial, público y servicios* encamina sus líneas de acción al diseño, construcción, reconversión energética y uso eficiente y sostenible de edificaciones [9].

En este marco la esta investigación aporta la caracterización térmica de los materiales constructivos usados comúnmente en Colombia para la construcción de envolventes de edificaciones en zonas rurales y urbanas, esencial para el diseño de viviendas pasivas y edificaciones de cero consumo energético (ZEB). El desconocimiento de las características térmicas de los materiales constructivos usados conlleva a la imposibilidad de generar futuras normas y/o políticas de ahorro energético en edificaciones en el contexto climatológico colombiano y al sobredimensionamiento de los sistemas de acondicionamiento de aire al tener gran incertidumbre en los valores de carga térmica a los que está expuesta la edificación, reflejados en los altos consumos de estos sistemas.

Basados en los niveles de prioridad de los subprogramas del sector residencial se percibe que el programa PROURE identifica como el principal consumidor energético de las edificaciones a la iluminación, lo cual se afirma de forma textual en el "ABC Uso Racional y Eficiente de Energía en Edificaciones" [10], tal afirmación goza de veracidad en aquellas ciudades de Colombia ubicadas en zonas de climas fríos como se evidencia en el estudio realizado por la Unidad de Planeación Energética (UPME) en la cual Bogotá presenta un consumo de hasta el 70% por iluminación y máximo de 10% por acondicionamiento de aire dependiendo del establecimiento, pero en ciudades de climas calientes como Barranquilla la iluminación representa máximo el 30% del consumo de energía y los sistemas de acondicionamiento de aire pueden llegar a representar el 80% [1], por tal motivo en regiones con estas características climatológicas los esfuerzos gubernamentales deben ser dirigidos a la disminución del consumo energético por acondicionamiento de aire. Para determinar la capacidad de refrigeración necesaria para una edificación se requieren, entre otras, las propiedades térmicas de los materiales constructivos de dicha edificación, las cuales son desconocidas a nivel nacional.

Optimizar las propiedades de los materiales constructivos usados conlleva a reducir la capacidad de refrigeración del equipo necesario representando disminución en el consumo de energía eléctrica.

### **1.3 OBJETIVOS**

A continuación se encuentran el objetivo general y los objetivos específicos a desarrollar en la presente investigación.

#### **1.3.1 Objetivo General**

Caracterizar el comportamiento térmico de los materiales constructivos usados comúnmente en Colombia para la construcción de envolventes de edificaciones

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Para alcanzar el objetivo general descrito es necesario apuntar hacia los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los materiales y técnicas constructivas usuales en zonas rurales y urbanas de Colombia
- Determinar los valores de conductividad térmica de los materiales constructivos usados comúnmente en Colombia para la construcción de envolventes de edificaciones
- Determinar los valores de calor específico de los materiales constructivos usados comúnmente en Colombia para la construcción de envolventes de edificaciones
- Determinar los valores de difusividad térmica de los materiales constructivos usados comúnmente en Colombia para la construcción de envolventes de edificaciones
- Determinar los valores de emisividad de los materiales usados comúnmente en Colombia para la construcción de envolventes de edificaciones.



#### **1.4 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

La metodología implementada en esta investigación, esta orientada a determinar los valores de las propiedades térmicas de los materiales constructivos típicos usados en Colombia, lo cual es una carencia actual del sector constructivo.

A continuación se muestra secuencialmente los pasos dados para el desarrollo de esta investigación: inicialmente se presenta una recopilación de información en el tema de investigación, para la conceptualización del estado del arte, consecutivamente se identifican y seleccionan los métodos de medición que permitirán la obtención de cada propiedad térmica. Luego se realiza una caracterización metrológica de los métodos de medición, seguido se realizan las mediciones pertinentes para el conjunto de materiales constructivos identificados y por último se lleva a cabo un diseño de experimento.

Posteriormente se detallan los principales módulos que componen la metodología de trabajo que se realizó en la presente investigación.

##### **Documentación Bibliográfica**

La documentación bibliográfica comienza con la recopilación de información, donde se realiza una búsqueda cuidadosa en fuentes electrónicas, bases de datos, banco de patentes, investigación de la información pertinente a los últimos avances de la temática en análisis en universidades públicas y privadas, además de entidades especializadas y publicaciones de especialistas, posteriormente se realiza la recopilación de información a través de los recursos y medios disponibles en la Universidad del Norte referente a las investigaciones y trabajos que se han hecho en esta línea de investigación.

##### ***Identificación y selección de métodos de medición de propiedades térmicas de materiales constructivos***

**Primera etapa:** Para la obtención de los modelos de medición de propiedades térmicas de materiales constructivos, inicialmente se plantea la necesidad de los

modelos, propósitos, tipos de análisis a ejecutar y condiciones, además de los parámetros y medidas apropiadas del desempeño del modelo.

**Segunda etapa:** Se realiza la síntesis de cada modelo, donde una vez comprendido cada fenómeno, se plantean las ecuaciones de cada una de las leyes físicas que gobiernan la metodología de medición.

**Tercera etapa:** Proceso de diseño de equipos requeridos en caso que alguna propiedad lo requiera y adecuación de instalaciones de la Universidad del Norte.

**Cuarta etapa:** Se realizan mediciones iniciales con las metodologías dadas para la selección de la adecuada.

### ***Caracterización metrológicas de métodos de medición.***

Para cada método de medición de propiedades seleccionado se presenta lo siguiente: propagación de error, análisis de capacidad de mediciones, atributos metrológicos y verificación de mediciones.

### ***Medición de propiedades térmicas de materiales constructivos de interés.***

Se obtienen los valores de experimentales de las propiedades de interés, densidad aparente, conductividad térmica, capacidad térmica, difusividad térmica y emisividad y se presenta análisis de varianza de un elemento constructivo para determinar si es significativo el valor dado

### ***Conclusiones***

A partir de los resultados obtenidos se comparan las propiedades de los materiales evaluados con los aceptados a nivel internacional.

## **1.5 CONTRIBUCIONES**

La presente investigación aportará al estado del arte conocimiento sobre las propiedades y desempeño energético de los materiales constructivos de Colombia, que servirá como base para diseño o rediseño de materiales o variaciones en su composición y geometría con miras a obtener mejor desempeño energético.

Igualmente, al contar con metodologías que integren requerimientos energéticos y constructivos, se dará mayor confiabilidad y mejores herramientas para la justificación económica de proyectos de nuevas construcciones, mejora de edificaciones existentes, y potencialmente generar normas técnicas nacionales con componentes de eficiencia energética de la edificación, tanto para su construcción como para su comercialización.

En caso de ser usada la información obtenida podrían ser

- Impactos en las políticas públicas (largo plazo). Los resultados y productos de la investigación son insumos necesarios dentro de procesos de desarrollo de normas relativas a la eficiencia energética de edificaciones en climas tropicales cálidos. El sector privado podrá promover de mejor manera el uso de materiales y sistemas constructivos tradicionales y alternativos aptos para el mejoramiento térmico de edificaciones en climas tropicales cálidos.
- Impactos regionales (largo plazo). En caso de aplicarse la tecnología que se está desarrollando por parte de los constructores: Impacto económico regional dado la disminución del consumo energético del sector de la construcción.
- Impactos ciencia y tecnología (corto plazo). Ampliación del conocimiento sobre materiales y sistemas constructivos tradicionales y alternativos aptos para el mejoramiento térmico de edificaciones en climas tropicales cálidos
- Impactos en el conocimiento del campo de estudio (largo plazo). Mayor confiabilidad y mejores herramientas para la justificación económica de proyectos de nuevas construcciones.
- Impactos sobre la productividad y competitividad de la entidad beneficiaria o el sector relacionado (largo plazo). Mejorar los niveles de comercialización de las edificaciones
- Impactos en la calidad de vida de la población (largo plazo). En caso de aplicarse la tecnología que se está desarrollando por parte de los

constructores: Impacto en la calidad de vida de la población por el ahorro de energía y/o mejoramiento del confort térmico en las edificaciones.

- Impactos sobre el medio ambiente y la sociedad (largo plazo). Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> por reducción de consumos energético en las edificaciones.

## **1.6 ANTECEDENTES**

El grupo de investigación en uso racional de la energía y preservación del medio ambiente – UREMA, categoría A1 en COLCIENCIAS, concentra sus actividades investigativas en cuatro líneas de investigación declaradas que son: Biocombustibles, Bioprocesos, Control Industrial de Procesos y Conversión de Energía, con el objetivo de incentivar el uso eficiente y sostenible de la energía en los distintos sectores productivos de la sociedad. Se destacan investigaciones en el uso eficiente de sistemas de acondicionamiento de aire basados en la filosofía Zero Energy Building y en el desarrollo de modelos de reducción energética en instalaciones de gran tamaño de aire acondicionado.

La presente tesis de maestría está enmarcada en el proyecto de investigación titulado: “Desarrollo de una metodología para el diseño y evaluación del comportamiento térmico y energético de edificaciones ubicadas en climas tropicales cálidos y húmedos”, enmarcado en el Área Estratégica de Energía de la Universidad del Norte, liderado por los departamentos de Arquitectura e Ingeniería Mecánica. Además se encuentra financiada por COLCIENCIAS en la modalidad de Joven investigador.

Actualmente la Universidad del Norte cuenta con un aliado estratégico internacional en la temática de edificaciones sostenibles como lo es el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

La presente tesis de maestría tiene por meta contribuir con la caracterización térmica de los materiales de construcción usados en fachadas y cubiertas de edificaciones ubicadas en zonas urbanas y rurales de Colombia, información esencial para la caracterización del desempeño energético de las edificaciones bajo las condiciones climatológicas de Colombia, lo cual es un objetivo clave para

alcanzar una de las meta del área estratégica de energía de desarrollar una metodología para el mejoramiento de las características térmicas de las envolventes de edificaciones en climas tropicales cálidos.

## **1.7 ESTADO DEL ARTE**

Para la presentación del estado del arte en este documento, se ha decidido dividir el conocimiento existente en cinco categorías articuladas con este tema de investigación: (1) Edificios de cero consumo (*Zero Energy Building*), (2) Tecnología de Generación y Reducción de Consumo de Energía en Edificaciones, (3) Metodologías y tecnologías de análisis energético de Edificaciones, (4) Envolventes y materiales en edificaciones, (5) Tecnologías existentes para la caracterización térmica de materiales constructivos.

### **1.7.1 Edificios de Cero Consumo (ZEB)**

El concepto *Zero Energy Building* ha obtenido gran atención internacional durante los últimos años, siendo considerado solución viable para la reducción del consumo energético y la mitigación de emisión de  $CO_2$  por parte del sector de la construcción [11][12]; el creciente número de proyectos [13][14][15] e investigaciones en el campo [16][17][18][19][20] destacan el notable interés en la implementación del concepto. En USA fue propuesto en el marco de “*Energy Independence and Security Act of 2007 (EISA)*” logrando ser soporte de diseño de las nuevas construcciones comerciales para 2030, lo cual busca que para 2040 la mitad de las construcciones de este tipo sean ZEB y en su totalidad para 2050 [21]. En la Unión Europea fue adoptado el concepto “*Nearly Zero Energy Building*” en mayo del 2010 en la directiva “*Directive on Energy Performance of Building*” (EPDB), en la cual se desarrolló la iniciativa que busca que para 2018 las construcciones gubernamentales sean construidas con base en ZEB y que todas las nuevas construcciones sean realizadas con base en esta para 2020 [22].

La eficiencia energética de una edificación no solo depende del diseño de la construcción sino también de las condiciones climatológicas locales (temperatura ambiente, humedad, radiación solar y velocidad de viento) en consecuencia

cambios en el clima pueden alterar el consumo de energía de la edificación [23]. Un aumento en la temperatura ambiente puede reducir la demanda de energía de los sistemas de calefacción sin embargo puede incrementar la demanda de energía de los sistemas de refrigeración eventualmente este incremento en el consumo de energía puede exceder el ahorro causado por calefacción, a partir de simulaciones se ha obtenido una disminución entre 36-58% en la energía consumida por calefacción y aumento entre el 223-1050% de la energía consumida por los sistemas de refrigeración [24]. El fenómeno del calentamiento global conlleva a cambios significativos de la eficiencia energética de las edificaciones y su efecto depende de las características climáticas actuales debido a que esto determina el tipo de sistema dominante refrigeración y/o calefacción [25]. Esto resulta en que la *Capacidad de reducción de emisiones (ERC)* disminuya en las regiones de climas cálidos donde se utilizan los sistemas de refrigeración y las regiones que presentan calefacción y refrigeración de forma balanceada durante el año, y aumente en los climas fríos en donde dominan los sistemas de calefacción [23].

Aplicar la filosofía ZEB trae consigo mejoras como: aumento del confort térmico debido a mayor uniformidad de la temperatura del aire interior, reducción del costo total operacional de la propiedad debido a mayor eficiencia energética, reducción del costo mensual neto de operación y protección contra futuras restricciones legales en cuanto a emisión de  $CO_2$  y eficiencia energética de las edificaciones [16][26].

Se han identificado puntos claves que deben ser clarificados para el desarrollo de una definición global de ZEB. Dentro de los cuales se destacan los siguientes: unidad de medida, periodo de tiempo de evaluación, balance de energía, conexión con la estructura y tipo de requerimientos de diseño [11].

La unidad de medida usada en la metodología de cálculo para el *Zero balance* varía dependiendo del objetivo del proyecto, la intención del inversionista, el nivel de preocupación medio-ambiental y el costo energético [27]; debido a esto se introducen los términos, *site ZEB*, *source ZEB*, *emissions ZEB* y *cost ZEB*. La

influencia que tiene la unidad de medida escogida sobre la metodología de cálculo es relevante debido a que debe indicar el impacto ambiental, la cantidad y la calidad de la energía.

El periodo de tiempo sobre el cual se realiza el *Zero balance* puede ser anual [28][29], mensual o en el ciclo de vida completo de la construcción. Este balance de energía debe incluir la energía que la construcción gasta en su funcionamiento y la energía requerida en el proceso constructivo [30]; el balance de energía debe realizarse entre la energía usada en la construcción y la generación de energía renovable [13][27][31][29], esta última se clasifica en on-site supply y off-site supply, dependiendo si la energía renovable es producida en los predios de la construcción o por fuera de la construcción. Además la construcción se clasifica dependiendo si tiene conexión eléctrica en *on grid* y *off grid* [32].

Aunque se muestra gran interés por parte de las entidades para desarrollar Códigos y Estándares que rijan la construcción de recintos sostenibles, los distintos enfoques dados por medio de la filosofía ZEB se prestan para ambigüedades, tales como la falta de unidad de medida, carencia de un horizonte de evaluación de la sostenibilidad y desacuerdo en cuanto a los tipos de energía a considerar, lo cual ha dificultado el desarrollo de una metodología generalizable y aceptada por países de diferentes condiciones geográficas. Por tal motivo, algunos países poseen códigos nacionales de construcción sin procedimientos estandarizados basados en casos de estudios particulares desarrollados en cada región. Algunas entidades han desarrollado métodos de evaluación energética como LEED, BREEAM, PassivHaus, AECB, MINERGIE, HQE y Living Building Challenge, ROE (Return on energy) y ROC (return on carbón), que sirven como base para el desarrollo de una metodología que facilite el trabajo de ingenieros y arquitectos en el diseño de construcciones ZEB. Sin embargo, estos métodos enlazan eficiencia energética con recomendaciones generales de diseño, sin configurarse como una metodología formal basada en propiedades de materiales y condiciones climáticas específicas, menos aún en climas tropicales.

## 1.7.2 Tecnología de Generación y Reducción de Consumo de Energía en Edificaciones

### 1.7.2.1 Tecnologías de Generación de Energía

Las tecnologías para obtener alta eficiencia energética y alto rendimiento térmico en las edificaciones incluyen:

- *Celdas fotovoltaicas integradas a la edificación*, estos son sistemas eléctricos solares integrados a la parte funcional de la edificación que tienen por función generar electricidad y actuar como material de construcción [33], incluyendo muros, techos, toldos de ventana, cortinas, claraboyas y cubiertas de pórticos[34].
- *Uso de luz natural sobre la luz artificial*. La luz eléctrica representa una porción significativa de energía en los recintos especialmente en los comerciales [35], rediseñando los edificios para optimizar el uso de luz natural reemplazando la luz eléctrica en áreas como pasillos, cafeterías y salones se puede obtener un impacto significativo en la reducción del consumo de energía de hasta un 77% del consumo de energía por iluminación [36].
- *Ventanas electroquímicas o ventanas inteligentes* que ahorran energía por medio del control de la cantidad de radiación solar de espectro no visible que pasa a través de ellas, lo cual se ve reflejado en la disminución de la carga térmica del recinto [37]; en invierno estas se aclaran y permiten el paso de radiación hacia el recinto pero no permite que esta salga, reduciendo de esta manera la cantidad de energía requerida para la calefacción y en verano estas se oscurecen sin bloquear la visibilidad, para reducir la cantidad de radiación que entra a través de ella, reduciendo los costos de enfriamiento.
- *Sistemas de alimentación de calefacción, ventilación y aire acondicionado*, que utilizan desperdicios de calor de la producción de electricidad en edificaciones para suministrarle potencia a los equipos de acondicionamiento de aire.



### **1.7.2.2 Modificaciones a Construcciones Existentes**

Estudios han reportado que el ahorro energético en edificaciones en climas tropicales puede alcanzar el 30% a partir de adaptaciones en construcciones existentes sin comprometer el confort [38]. Tales adaptaciones son categorizadas de acuerdo al costo de la inversión inicial [39]:

*Las medidas de mayor inversión* se implementan a través de renovación de los sistemas de acondicionamiento, dentro de esta categoría se destaca el uso de equipos de refrigeración de mayor coeficiente de rendimiento (COP) y el uso de los sistemas de volumen de aire variable (VAV) contra los sistemas de volumen de aire constante (CAV), debido a que los sistemas VAV pueden regular la cantidad de aire suministrado en función de la carga térmica de la construcción lo cual brinda mayor eficiencia energética, encontrando ahorros energéticos de hasta 16.9% mensual [39].

*Las medidas de menor inversión* son implementadas sobre modificaciones en el diseño de la construcción, como la integración de luz natural con luz artificial. La energía consumida por iluminación representa en promedio el 40% de la energía usada en una construcción típica de oficina [39]; dentro de las medidas para disminuir el consumo de energía por iluminación está el uso de lámparas de mayor eficiencia, el uso de ventanas con mayor resistencia térmica y baja emisividad, beneficiando la reducción de ganancia de energía y mejorando el nivel de confort.

*Las medidas de cero inversiones* no requieren modificación de la construcción o del sistema existente, simplemente requiere un estudio detallado del sistema de climatización para determinar el punto de óptimo funcionamiento.

## **1.7.3 Metodologías y tecnologías de análisis energético de edificaciones**

### **1.7.3.1 Software**

Para la evaluación energética se han desarrollado programas que permiten el modelamiento de las edificaciones especificando posición, geometría y materiales constructivos como lo son BLAST, Energy Plus, Right-Suite, Simedif, TRNSYS, ESP-r, COMFIE, BEopt, BESTEST, AccuRate y DesignBuilder. Estos software de

modelación energética de edificaciones utilizan datos climatológicos tomados de años típicos (TMY) y proyectan el comportamiento de las variables climatológicas en el tiempo y asumen que el comportamiento es similar al real. La Evaluación de Ciclo de Vida (LCA) es realizado para determinar el impacto ambiental de las edificaciones, en este se incluyen factores como la fabricación de los componentes, construcción, operación de mantenimiento, desmantelamiento y tratamientos de residuos; tal evaluación se realiza en programas como SIMAPRO<sup>1</sup>, ATHENA<sup>2</sup> y EQUER<sup>3</sup>.

### **1.7.3.2 Metodologías de evaluación energética en edificaciones**

Se han desarrollados metodologías de evaluación energética como LEED [40], BREEAM[40], PassivHaus [30], AECB [41], MINERGIE [42], HQE [43], Living Building Challenge [44] , ROE (retorno de la energía) [11] y ROC (retorno de carbón) [11], que aunque no se presentan como metodologías generalizables y utilizadas independientemente de su ubicación geográfica, sirven como base para el desarrollo de una metodología que facilite el trabajo de ingenieros y arquitectos en el diseño de construcciones ZEB en climas tropical húmedos. La sociedad americana para ingenieros en calefacción, refrigeración y acondicionamiento de aires, ASHRAE por sus siglas en inglés, también ha desarrollado su propia metodología para medir el desempeño energético de la edificación en su vida útil, la cual se encuentra establecida en el ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2013, "Energy standard for buildings except low-rise residential buildings." [45]

### **1.7.4 Envoltentes y Materiales en Edificaciones**

La construcción de envoltentes se muestra como un factor clave para determinar la calidad y el control de las condiciones interiores de una construcción independientemente de las condiciones externas a la edificación. Varios componentes como paredes, vidriería, techo, aislamiento térmico son parte importante del diseño de la construcción debido a que un apropiado diseño

---

<sup>1</sup> SIMAPRO 7 desarrollado por la empresa PRé Consultants

<sup>2</sup> ATHENA (versión única) desarrollado por Athena Sustainable Materials Institute

<sup>3</sup> EQUER (versión única) desarrollado por Ecole des Mines de Paris, CEP

arquitectónico de las envolventes puede significar disminución del consumo de energía[46].

Las paredes son una predominante fracción de las envolventes y tienen por objetivos proveer confort térmico y acústico sin comprometer la estética del edificio. La resistencia térmica de la pared es crucial ya que influye en el consumo de energía y sobre todo en edificios de gran altura donde la relación entre área de pared y área total de la envolvente es alta [46]. La preocupación por reducir el consumo energético en las edificaciones ha permitido que en países desarrollados el sector de la construcción disponga de un amplio conocimiento de los valores de resistencia térmica de los materiales constructivos y de la influencia de considerar el efecto de aislamiento térmico, lo cual ha permitido desarrollar políticas de regulación energética opcionales, obligatorias o estándar para las edificaciones. Por el contrario, en países ubicados en zonas de clima tropical húmedo como Colombia se ha dificultado la inclusión de políticas fuertes que conlleven a ahorro energéticos debido a la escases de investigaciones en el tema[6].

Convencionalmente basados en el tipo de material de construcción las paredes pueden ser clasificadas como a base de madera, a base de metal y base de mampostería; actualmente son utilizados distintos tipo de diseño de pared que permiten mejorar la eficiencia energética y nivel del confort de las edificaciones.

Las paredes solares pasivas típicamente usadas en climas fríos son utilizadas para captar y transmitir la radiación solar de forma eficiente hacia el interior de la construcción, ejemplo de esto se encuentran los paredes tipo Trombe [47]. Las paredes de hormigón ligero pueden aumentar su resistencia térmica utilizando agregados naturales tales como piedra pómez, diatomita, arcilla expandida, o de subproductos como espumas y cenizas [48]. Las paredes ventiladas o “double skin” tienen un espacio de aire entre las dos paredes de mampostería, la cavidad de aire resultante puede poseer ventilación forzada o ventilación natural, este tipo de pared es usada para mejorar la refrigeración pasiva de los edificios, el ahorro energético aumenta con el aumento de la anchura de la cavidad hasta una medida propia de cada sistema; se han documentado ahorros de hasta 40% en el sistema

de enfriamiento con el uso del sistema de doble piel (double skin) [49] y las paredes con materiales de cambio de fase para contribuir al almacenamiento de calor latente [50].

Las aberturas en la envoltura de las edificaciones tales como ventanas y puertas, poseen un papel vital en la proporción de confort térmico y niveles óptimos de iluminación en una edificación. A nivel arquitectónico son importantes por la adición de estética para la construcción. En los últimos años ha habido avances en las tecnologías de vidrierías. El uso de vidrios de control solar, vidrios aislados, vidrios de baja emisividad, vidrios con elementos ópticos holográficos, vidrios de sólidos porosos, vidrios con vacío inducido, vidrios de múltiples cavidades con gases y vidrios con partículas suspendidas [51].

Los techos son una parte fundamental de las envolturas de edificaciones que son altamente susceptibles a la radiación solar y otros cambios ambientales por lo que influyen sobre las condiciones de confort de los ocupantes al interior [46]. En los climas tropicales pueden ser aplicadas técnicas de enfriamiento pasivo que disminuyan su ganancia de calor, tales como el diseño de techos compactos con mínima exposición solar, techos con ventilación natural o forzada por espaciamiento entre losa, techos doble, techos de gran altura, techos abovedados, techos de materiales de alta reflectividad, techos verdes los cuales son con cubiertos de vegetación para proporcionar humedad y sombra, techos con sombra proporcionada por agentes externos, el uso de materiales de alta capacidad térmica como el hormigón para reducir al mínimo la carga máxima de la construcción, techos con paneles fotovoltaicos techos con aislamiento térmico y techos con sistemas de enfriamiento por evaporación [52].

El aislamiento térmico es un material o combinación de materiales que aplicados correctamente retardan la velocidad de flujo de calor por conducción, convección radiación por su alta resistencia térmica. El uso adecuado del aislamiento térmico no solo reduce el consumo de energía sino que permite poder seleccionar equipos de refrigeración de menor capacidad lo cual conlleva a disminuir su consumo [53].

### **1.7.5 Tecnologías existentes para la caracterización térmica de materiales constructivos**

Para cualquier software de simulación energética de edificaciones la entrada requerida para un material son la conductividad térmica, la capacidad térmica y el calor específico [54][55]. Estas tres propiedades pueden ser medidas de muchas formas pero al medir dos de ellas puede ser determinada la tercera por medio de la Ec.1:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \text{ (Ec. 1)}$$

Donde  $\alpha$  es la difusividad térmica,  $k$  es la conductividad térmica,  $\rho$  es la densidad aparente y  $c_p$  es el calor específico.

#### **1.7.5.1 Conductividad térmica**

La medición de las propiedades térmicas de los materiales es clave para obtener un comportamiento óptimo para una aplicación en particular. En el caso de la conductividad térmica hay un gran número de técnicas que permiten determinarla[55]. El primer grupo de medición son las técnicas de estado estable. las técnicas se basan en el establecimiento de un gradiente de temperatura sobre un espesor conocido de una muestra y el control del flujo de calor de un lado al otro, estas son principalmente usadas para analizar materiales con magnitudes bajas o media de conductividad térmica a baja temperatura. Las técnicas transitorias miden la temperatura y el tiempo de respuesta de la muestra cuando una señal es enviada para generar calor en el cuerpo analizado. Este método puede ser usado para medir la difusividad térmica y/o la conductividad térmica para un amplio rango de temperaturas[56]. Las técnicas en estado estable requieren frecuentemente mayor tiempo y la migración de humedad puede introducir significativos cambios en la medición [55].

#### 1.7.5.1.1 Técnicas en estado estable

La técnica se basa en el establecimiento de un gradiente de temperatura sobre un espesor conocido de una muestra y el control del flujo de calor de un lado al otro controlando que el flujo de calor sea lo más unidireccional posible.

El aparato de placa caliente con guarda (GHP) descrito en la norma ASTM-C-177, consiste en un calentador ubicado en la parte central con flujo de calor uniforme y controlado en la zona de medición y aislado por guardas[57]. Una serie de sensores de temperatura son fijados a la superficie central del instrumento y a la guarda. Se suministra energía por medio de una fuente DC al plato caliente y los sensores de temperatura ubicados en los platos fríos y en la guarda ajustan y controlan que la temperatura en las superficies sea uniforme. Obteniendo una aproximación de la propiedad aplicando la ley de Fourier en una dimensión[58]. La superficie de la muestra debe ser plana y paralela para minimizar la resistencia por contacto entre estas dos superficies pero debido a la rugosidad de la superficie de la muestra no es posible, las superficies desiguales podrían resultar en una diferencia de temperatura apreciable entre la superficie de placa y la muestra [59]. Se han desarrollado algoritmos de control para minimizar el tiempo para alcanzar la temperatura requerida y el flujo de calor para reducir el tiempo de cada prueba [60].

Para la técnica del medidor de flujo de calor descrito en la norma ASTM-C 518, una muestra cuadrada de geometría conocida se ubica dentro de dos platos. El flujo de calor a través de la muestra es medido por medio de un sensor de flujo de calor calibrado para un gradiente de temperatura establecido. Puede ser usado para muestras grandes y rangos de conductividad grandes. El principio de medición es casi el mismo que el anterior, pero la sección de prueba está rodeada por un calentador de guardia, resultando en temperaturas más altas de medición.

La técnica de caja caliente descrita en la norma ASTM-C-236 es normalmente usada para medir la transferencia de calor total a través de grandes estructuras no homogéneas. En esta medición se determina la resistencia térmica total que incluye las resistencias del aire en los lados frío y caliente junto con la resistencia

a la conducción del calor de la muestra. La muestra se coloca entre la cámara caliente y la fría a condiciones fijas de temperaturas, humedad y condiciones de flujo de aire. Las mediciones se llevan en la parte central de la muestra. Los sensores de temperatura son ubicados aproximadamente de forma opuesta para obtener la temperatura correspondiente. La prueba se realiza estableciendo y manteniendo una diferencia de temperatura deseada constante a través de un panel de ensayo durante un período de tiempo de modo que el flujo de calor constante y una temperatura constante están aseguradas. Cuando la temperatura del aire a través de la pared de la caja de medición se mantiene la misma, el intercambio de calor entre la caja de medición y el cuadro de guardia es cero. En este momento, el flujo de calor (dc-alimentación) se mide. Esta es una medida de calor en la caja de medición a través de un área conocida del panel[61].

Se resumen las características principales de las técnicas en estado estable de medición de conductividad térmica en la **Tabla 1** [56]:

**Tabla 1** Técnicas de medición de conductividad térmica en estado estable

<b>TÉCNICA DE MEDICIÓN</b>	<b>TIPO DE MATERIAL</b>	<b>RANGO DE TEMPERATURA (°C)</b>	<b>RANGO DE <math>k</math> (w/mK)</b>
<b>Placa caliente con guarda</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Composición homogénea</li> <li>• Aislante térmico</li> </ul>	-180 a 200	0.0001 a 2
<b>Medidor de flujo de calor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aislante térmico</li> </ul>	-100 a 200	0.007 a 1
<b>Caja Caliente</b>	Ensamblajes de materiales de construcción: <ul style="list-style-type: none"> <li>• madera</li> <li>• mampostería</li> <li>• vidrios</li> </ul>	-20 a 40	0.2 a 5

#### 1.7.5.1.2 Técnicas en transitorio

Este tipo de técnica es muy usada en materiales con alta conductividad térmica y altas temperaturas. Poseen gran precisión y amplio rango de medición (hasta 2000°C) y fácil preparación de la muestra. El método transitorio puede ser dividido en dos categorías dependiendo del tipo de aparato usado en la medición: técnica de contacto y técnica óptica.

La técnica de contacto es ampliamente usada por su simplicidad, la muestra puede ser rectangular o cilíndrica y tiene embebida una fuente de calor y sensores de temperatura; la fuente de calor genera un pulso de calor producido por un cambio en la corriente eléctrica para generar un campo de temperatura dinámico dentro de la muestra; el cambio de temperatura con el tiempo es medida por un sensor (s) que o bien se unificó con la fuente de calor o se coloca a una distancia fija de la fuente. Dentro de las técnicas de contacto se destaca el método de hilo caliente, descrito en la norma ASTM-C-1113; este método utiliza una sonda de conductividad térmica o un alambre como fuente de transferencia de calor y estima el calor transferido conociendo la corriente consumida y la resistencia eléctrica del calentador [55][57].

Se resumen en la Tabla 2 las características principales de las técnicas en estado transitorio de contacto de medición de conductividad térmica [56]

Tabla 2 Técnicas de medición de conductividad térmica en estado transitorio

TÉCNICA DE MEDICIÓN	TIPO DE MATERIAL	RANGO DE TEMPERATURA (°C)	RANGO DE $k$ (w/mK)
<b>FUENTE DE CALOR LINEAL</b>			
<b>Banda caliente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vidrios</li> <li>• Comida</li> <li>• Cerámicos</li> </ul>	-50 a 500	0.1 a 5
<b>Hilo caliente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Refractarios</li> <li>• Minerales</li> <li>• Vidrios</li> <li>• Plásticos</li> </ul>	-40 a 1600	0.001 a 20
<b>Sonda de aguja</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minerales</li> <li>• Polímeros</li> <li>• Plásticos</li> <li>• Comidas</li> </ul>	-50 a 500	0.05 a 20
<b>FUENTE DE CALOR PLANA</b>			
<b>Pulso transitorio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polímeros</li> <li>• Cerámicos</li> <li>• Aislamiento térmico</li> <li>• Plásticos</li> <li>• Materiales de construcción</li> </ul>	-40 a 400	0.05 a 20
<b>Step-wisetransient</b>			
<b>Hot platetransient</b>			



La técnica óptica posee un rango de medición de conductividad térmica mayor y además esta tecnología posee un costo mayor a las basadas en la técnica de contacto. El principio de medición es basado en generar y detectar un pulso de energía u ondas térmicas. La difusividad del material se mide directamente al igual que el calor específico, para finalmente obtener la conductividad térmica. La técnica más común es el método laser (*Laser flash method*), en esta la muestra se coloca en un horno y se calienta hasta una temperatura uniforme, un pequeño pulso (1ms o menos) irradia la superficie de la muestra; el resultado del aumento de temperatura en la superficie es medido por Termocuplas. La difusividad es calculada de la gráfica de temperatura versus tiempo y espesor de la muestra. Se resumen las características principales de las técnicas en estado transitorio tipo óptico de medición de conductividad térmica [56]

Tabla 3 Técnicas en estado transitorio tipo óptico para medición de conductividad térmica.

TÉCNICA DE MEDICIÓN	TIPO DE MATERIAL	RANGO DE TEMPERATURA (°C)	RANGO DE $k$ (w/mK)
<b>Método de Laser Flash</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metales,</li> <li>• Polímeros,</li> <li>• Cerámicos</li> </ul>	-100 a 3000	0.1 a 1500
<b>Método Angstrom</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metales,</li> <li>• Cerámicos,</li> <li>• Polímeros,</li> <li>• Multifases</li> </ul>	-100 a 1300	Cercano a 0.5
<b>Modulated beam technique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metales,</li> <li>• Cerámicos,</li> <li>• Polímeros</li> </ul>	300 a 2000	1 a 500
<b>Photothermal methods</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequeños especímenes</li> </ul>	-50 a 500	0.1 a 200

#### 1.7.5.1.3 Características de los métodos de mediciones actuales

No hay una técnica única que permita medir efectivamente la conductividad térmica de todos los materiales usados en el sector de la construcción. La

confiabilidad de un método de medición depende de varios factores, tales como la velocidad de operación, precisión requerida, versatilidad en cuanto a ejecución en virtud de las condiciones ambientales, naturaleza y forma de la muestra.

El desarrollo de nuevos métodos experimentales y el mejoramiento de los métodos existentes para medir propiedades son altamente deseables. Es deseable el desarrollo de metodologías capaces de proporcionar mediciones precisas y exactas, con incertidumbres menores al 5% y tiempo de ejecución menores a 1min [57]

#### **1.7.5.2 Capacidad térmica**

Existen varios métodos para la determinación experimental de la capacidad calorífica específica en sólidos. Los métodos más importantes son: el método de mezclas, adiabático, comparativo, de relajación de temperatura, calorimetría modulada y variantes de todos ellos.

El método de mezcla es empleado para mediciones del calor específico en sólidos a temperatura ambiente. Este método aporta resultados precisos en el rango de temperatura donde no existen transiciones de fase del material. Consiste en llevar el material estudiado desde un horno a una temperatura dada, al calorímetro. La cantidad de calor que intercambia la sustancia y que es medida por el calorímetro, es la variación de entalpía.

El método adiabático se fundamenta en la determinación de manera directa de la energía necesaria para incrementar la temperatura de una sustancia en un pequeño intervalo, desde una fracción de grado a unos pocos grados, esta técnica es aplicada a bajas temperaturas.

El método comparativo es similar al de mezclas, sin embargo en este caso se determina el calor específico de la muestra a partir de mediciones con una muestra de propiedades conocida.

En el método de relajación de temperatura una muestra es suspendida adiabáticamente en un recipiente al vacío, mientras una de sus superficies se ilumina uniformemente al mismo tiempo que la temperatura de su superficie

posterior es monitoreada en función del tiempo, a partir de esta dependencia se obtiene el calor específico.

El último método es el método de calorímetro modulado. En este el material bajo estudio es sometido a excitación modulada, suministrándole energía mediante algún mecanismo. Partiendo de un balance de energía se obtiene una expresión de la temperatura en el tiempo, la cual será modulada y dependiente del calor específico.

### **1.7.5.3 Difusividad térmica**

Para la determinación de la difusividad, la cual es una propiedad derivada, existen métodos indirectos y directos. Los métodos indirectos buscan determinar por separado la capacidad térmica y la conductividad del material.

Entre los métodos directos existe una división en estáticos y dinámicos. El método estático de mayor uso es el de hilo caliente en el cual un flujo de calor de magnitud conocida se hace pasar a través de un alambre colocado en el interior de la muestra y se mide la variación de temperatura durante un intervalo de tiempo debido a la disipación de calor en el medio. Modificaciones de este método conllevaron al método de laser flash (flash laser) en el cual se incide un pulso de luz sobre el material y detectando directa o indirectamente los cambios subsecuentes en su temperatura se obtiene la propiedad; la medición de temperatura puede ser remota mediante la medición de sensores infrarrojos, por esto la temperatura puede ser variada en un amplio rango para estudiar la dependencia de la difusividad con la temperatura.

En las técnicas de tipo dinámico la de mayor uso son las fototérmicas basadas en la conversión de energía luminosa absorbida de manera periódica por un material en calor y en la medición de la temperatura generada

### **1.7.5.4 Emisividad**

#### **1.7.5.4.1 Métodos de medición**

- Medición comparativa con un termómetro de contacto.

Se mide la temperatura de superficie del objeto con un sensor de temperatura de contacto previamente calibrado, posteriormente se mide la temperatura en la misma zona con una cámara termografía con el valor de emisividad ajustado en 1. La diferencia de temperatura que se obtiene se debe a que el valor de emisividad de la cámara está ajustado en un valor muy elevado, por lo tanto se debe gradualmente disminuir el valor hasta que la temperatura detectada por la cámara corresponda a la del termómetro de contacto.

- Medición comparativa con la cámara misma.

Se adhiere un pedazo de cinta adhesiva de emisividad conocida al objeto a medir (0.95-1). Debido a que conocemos la emisividad de la cinta adhesiva, una vez el objeto y la cinta hayan llegado a equilibrio térmico podemos medir la temperatura del objeto apuntando a la cinta, este valor sirve como temperatura de referencia. Posteriormente debemos ajustar la emisividad hasta que la cámara muestre la misma temperatura en una zona sin cinta que en una zona con la cinta adhesiva.

## **1.8 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO**

El documento final de esta investigación contiene la siguiente organización.

El primer capítulo hace una evaluación del estado del arte, el cual divide el conocimiento existente en cinco categorías articuladas con el tema de investigación: (1) edificios de cero consumo (zero energy building), (2) tecnología de generación y reducción de consumo de energía en edificaciones, (3) metodologías y tecnologías de análisis energético de edificaciones, (4) envolventes y materiales en edificaciones, (5) tecnologías existentes para la caracterización térmica de materiales constructivos. Además se explica detalladamente el alcance, objetivos y metodología de la investigación. Como resultado de este capítulo se plantea la pregunta de investigación **¿Cuáles son los valores de las propiedades térmicas de los materiales constructivos usados comúnmente en Colombia para el diseño de envolventes de edificaciones en zonas rurales y urbanas?**

En el segundo capítulo se identifican y seleccionan los modelos matemáticos y procedimientos utilizados para la medición de densidad aparente, conductividad

térmica, calor específico y emisividad. Se presenta el proceso de diseño de los equipos necesarios. Posteriormente se realizan las pruebas iniciales para escoger la metodología indicada para cada medición.

El tercer capítulo presenta la caracterización metrológicas de los métodos seleccionados. Se realizan análisis de propagación del error, de capacidades de medición, de atributos metrológicos y se lleva a cabo la validación de mediciones de cada método.

El cuarto capítulo está dedicado a la identificación de los materiales constructivos tradicionales de Colombia y a la presentación de los valores experimentales de las propiedades térmicas obtenidas en los laboratorios de máquinas hidráulicas y tratamientos térmicos de la Universidad del Norte.

En el quinto capítulo se discuten los resultados obtenidos de las propiedades térmicas de los materiales de construcción y se compran con valores de propiedades aceptadas por una entidad internacional.

En el sexto capítulo se exponen las **conclusiones** a las que se arribó tras el desarrollo de este trabajo, así como la **bibliografía** referenciada en el documento.

Por último, en los anexos se muestran los soportes de diseño del equipo de medición de conductividad térmica, la interfaz de medición desarrollada y el modo de funcionamiento del equipo. Se muestran además la totalidad de las pruebas de conductividad térmica, calor específico, difusividad térmica y emisividad.

## **2 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE MÉTODOS DE MEDICIÓN**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

Esta sección describe los modelos matemáticos y procedimientos utilizados para la caracterización térmica de materiales constructivos y se muestran los criterios de selección de cada método.

Para caracterizar el comportamiento térmico de un material deben ser conocidas ciertas propiedades que se ven involucradas en los cálculos de transferencia de calor. Dichas propiedades son la densidad aparente, conductividad térmica, calor específico, difusividad térmica y emisividad. Dichas propiedades nos permitirán comprender el comportamiento térmico que poseen los materiales constructivos en una edificación. Permitiendo realizar cálculos con certeza de ganancia y pérdida de calor de edificaciones, dimensionamiento de equipos de acondicionamiento de aire y cálculo de consumos energéticos, bases necesarias para encaminar la construcción de las edificaciones a una sostenibilidad energética.

### **2.2 ECUACIONES DE GOBIERNO**

El calor es la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura; un análisis termodinámico se interesa en la cantidad de transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro. En un análisis de transferencia de calor se determinan las razones de esas transferencias dadas desde el medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja.

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Dichos modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia la de menor temperatura.

Las metodologías de medición propuestas de cada una de las propiedades térmicas son basadas en la teoría básica de transferencia de calor. A continuación se presentan cada una de las metodologías planteadas.

### 2.2.1 Densidad aparente

Los materiales constructivos son cuerpos heterogéneos que presentan porosidades internas dependiendo del grado de compactación y algunos presentan cavidades de aire propias de la geometría del material; el volumen total que el material constructivo ocupa una vez se encuentra instalado, es una parte ocupado por el material que compone el material constructivo y otra parte por el aire presente en la cavidades. El valor de densidad tabulado para cada material constructivo debe tener en cuenta el volumen y masa total ocupada por el material del material y el aire de las cavidades, por ende se medirá la densidad aparente del material, la cual es calculada de la siguiente forma:

$$\rho = \frac{m_{mat} + m_{aire}}{V_{mat} + V_{aire}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Para la medición de esta propiedad se plantea una prueba única, que consiste en la medición de la masa conjunta del material más el aire en una balanza y la medición del volumen total por medio de la medición de la geometría del material.

### 2.2.2 Densidad por área lateral

La cantidad de energía almacenada por un material constructivo depende del calor específico del material y de la masa que posea, entre mayor es su masa mayor será la cantidad de energía que está en la capacidad de almacenar. Una medida utilizada para cuantificar esto, es comparar la masa de materiales por  $1 m^2$  construido:

$$\rho_{Ar} = \frac{m_{total}}{A_{lateral}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Para la medición de esta propiedad se plantea una prueba única, que consiste en la medición de la masa en una balanza y la medición del área por medición de la geometría.

### 2.2.3 Masa del material constructivo

Esta propiedad intrínseca de los materiales interviene en mucho de los cálculos termodinámicos y de transferencia de calor realizados, Debido a esto es esencial su conocimiento. Esta propiedad se determina de forma directa con una balanza

de precisión de  $\pm 0.1g$  en caso que el peso sea menor de 10 kg y para valores mayores de hasta 15 kg con una balanza de precisión  $\pm 1g$  .

#### **2.2.4 Masa de agua**

Los valores de las propiedades medidas dependen del porcentaje de humedad del material. Cada vez que se realiza una prueba el material posee una humedad de equilibrio entre el ambiente y él mismo; es necesario conocer el porcentaje de humedad presente en cada material, para lo cual se calienta cada material en un horno industrial presente en la Universidad del Norte hasta 200 °C y se mantiene esta temperatura durante 2 horas. El material es pesado antes y después del proceso de secado, la diferencia de masa es la cantidad de agua presente en el material en equilibrio.

#### **2.2.5 Conductividad térmica**

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 o gases. La razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de este, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él. A nivel experimental se ha podido concluir que la razón de la conducción a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y al área de transferencia de calor y es inversamente proporcional al espesor de esa capa, es decir,

$$\text{Razón de conducción del calor} \propto \frac{(\text{Área})(\text{Diferencia de temperatura})}{\text{Espesor}}$$

O bien,

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (\text{Ec. 4})$$

En donde la constante de proporcionalidad  $k$  es la conducción térmica del material que es la medida de la capacidad de un material para conducir calor. La anterior relación se conoce como ley de Fourier de la conducción de calor y es



fundamentación de los métodos presentados para la medición de la conductividad térmica.

El diseño del equipo de medición de conductividad térmica se presenta como un paso metodológico esencial debido a que es un equipo para materiales constructivos fuera de normas técnicas.

A continuación se presentan los métodos tenidos en cuenta para la estimación de los valores de conductividad térmica:

### 2.2.5.1 Método 1

Para determinar la conductividad térmica se calienta una capa de material de espesor y área conocida, desde uno de sus lados, por medio de un calentador de resistencia eléctrica de potencia conocida. Si las superficies exteriores del calentador están bien aisladas, la mayor parte del calor generado por la resistencia se transferirá a través del material cuya conductividad se va a determinar. Midiendo las dos temperaturas de las superficies del material cuando se llega al estado estacionario de la transferencia y sustituyéndolas en la ecuación presentada junto a las otras cantidades conocidas se obtiene la conductividad térmica.

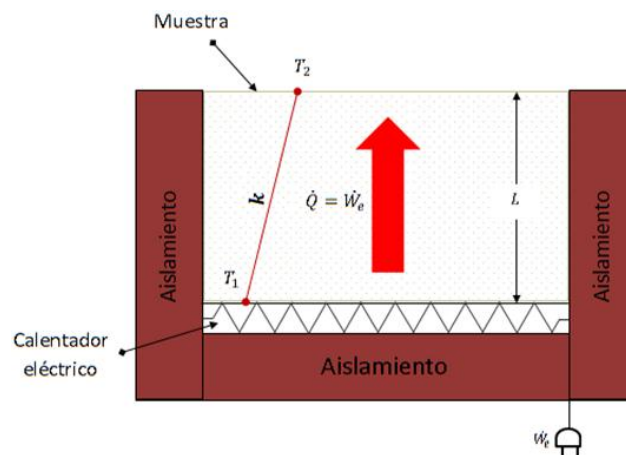


Figura 1 Diseño conceptual de equipo de medición de conductividad térmica

La obtención de la conductividad térmica se obtiene despejando en Ec.4

$$k = \frac{\dot{Q}_{cond} \Delta X}{A \Delta T} \quad (\text{Ec. 5})$$

2.2.5.1.1 Diseño de equipo para evaluación térmica de materiales de construcción  
 Se presenta a continuación el proceso de diseño del equipo de medición, partiendo inicialmente en el cálculo del espesor óptimo de aislante térmico para disminuir la pérdida de calor con el medio externo, dimensionamiento general del equipo y posteriormente el diseño de la estrategia de control a utilizar.

### Cálculo de espesor óptimo de aislamiento térmico

Se lleva a cabo el cálculo de espesor de aislamiento térmico únicamente para el lado en contacto con la superficie de la resistencia eléctrica debido a que es el lado que estará expuesta a mayores temperaturas y tendrá mayor espesor de aislante para una misma pérdida de calor en comparación con cualquier otro lado.

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$kA \frac{(T_i - T_s)}{\Delta L} = hA_s(T_\infty - T_s) + \varepsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (\text{Ec. 7})$$

El espesor de aislante es concebido para que la pérdida de calor de la máquina para evaluación térmica de materiales constructivos sea menor al 1%.

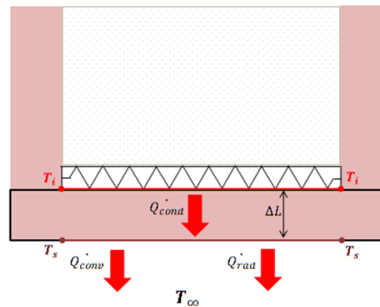


Figura 2 Pérdida de calor esperada del equipo de medición de conductividad térmica

Inicialmente se supone un valor de potencia de la resistencia eléctrica, posteriormente este valor debe ser verificado con las características de potencia de las resistencias eléctricas del mercado.

$$\dot{Q}_{supuesto} = 1000 \text{ W}$$

El 1% de las pérdidas de calor se distribuye en las 5 caras del equipo de medición (4 laterales y 1 inferior) que están expuestas al ambiente. Aunque las pérdidas de calor no se distribuyen uniformemente en las 5 caras es conservador asumir que cada cara tiene una pérdida de 0.2% y realizar los cálculos de espesor de aislante térmico para la cara inferior sobre la que se soporta la resistencia eléctrica, la cual es la más expuesta a pérdidas de calor, y este mismo espesor será utilizado en todas las demás caras. Con lo anterior el problema se reduce a unidimensional y se asegura que la pérdida de calor es menor o igual al 1%.

El equipo de medición debe ser versátil debido a que una misma geometría del equipo debe ser capaz de poder adaptarse a distintos tamaños de materiales de construcción para llevar a cabo la medida. La estrategia utilizada para dar solución al requerimiento será usar el mayor tamaño de una cara lateral de un bloque (la cual estará en contacto con la resistencia) como el tamaño de la resistencia eléctrica. Cuando se utilice una estructura constructiva con una cara lateral menor, el volumen en exceso es ocupado por aislante térmico.

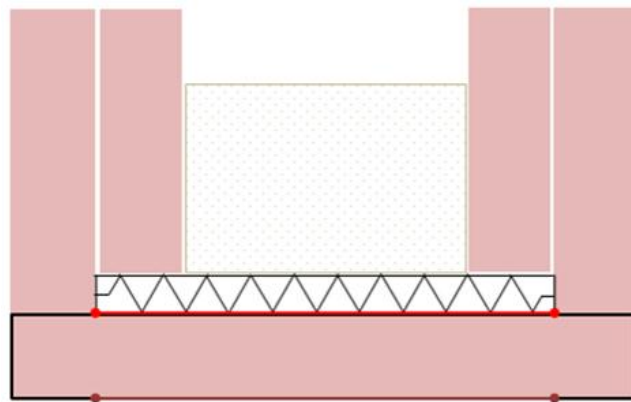


Figura 3 Configuración de equipo de medición de conductividad térmica en funcionamiento

El tamaño seleccionado para la resistencia es de 0.4 x 0.2 m correspondiente al bloque de *hormigón* 0.40x 0.20 x 0.20 m. La conductividad térmica del aislante usado se asume  $0.044 \frac{W}{mK}$ , valor máxima permisible para que comience a ser considerado un material como aislante. Se asume un coeficiente convectivo de 40

$\frac{W}{m^2}$ . La máxima temperatura a la cual será llevado a cabo la medición será 80°C, lo cual permitirá seleccionar el tipo de aislante térmico.

El material del equipo de medición por costo, facilidad de trabajo y baja conductividad térmica es madera.

A continuación se resume lo enunciado:

$$Q_{cond} = 0.2 W$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$$

$$k = 0.044 \frac{W}{mK}$$

$$\varepsilon = 0.92$$

$$h = 40 \frac{W}{m^2}$$

$$T_i = 80^\circ C$$

$$\Delta L = \text{Espesor de aislante}$$

$$T_s = \text{Temperatura de la superficie}$$

$$T_\infty = 25^\circ C$$

$$A_s = 0.08 m^2$$

Aplicando la Ec.7:

$$hA_s(T_s - T_\infty) + \varepsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_\infty^4) = 0.2$$

$$(40)(0.0625)(T_s - 298.3) + (0.92)(5.67 \times 10^{-8})(T_s^4 - 298.3^4) = 0.2$$

$$T_s = 298.325 K = 25.025^\circ C$$

$$(0.044)(0.0625) \frac{(80 - 25.025)}{\Delta L} = 2$$

$$\Delta L = 0.0756 m \approx 7.6 cm$$

Por lo anterior el espesor mínimo de aislante térmico es de **0.076 m**.

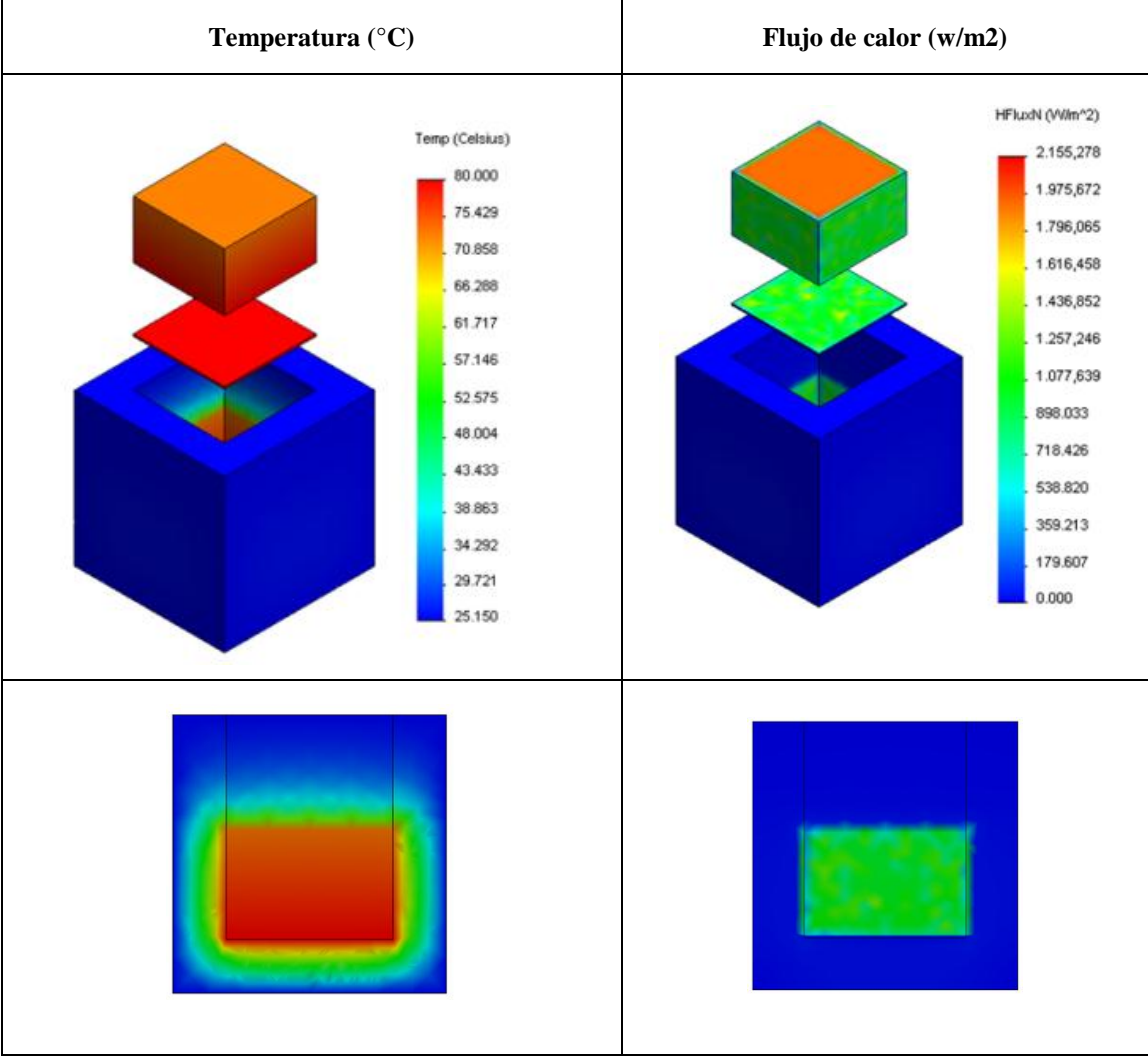
En el anterior cálculo se asume la transferencia de calor unidimensional para disminuir su complejidad. Con la geometría determinada se lleva a cabo una simulación de elementos finitos en la herramienta computacional SolidWorks 2011, para verificar este supuesto.

Para esta simulación se tiene en cuenta únicamente el espesor de aislante encontrado, una placa para la entrada de potencia y el material constructivo. Las condiciones de fronteras utilizadas en dicha simulación son las siguientes:

*Coeficiente convectivo: 40 W/K m<sup>2</sup>*  
*Temperatura de resistencia: 80°C*

*Potencia de resistencia: 1000W*  
*Temperatura ambiente: 25°*

**Tabla- 4 Simulación del comportamiento térmico de equipo de medición de conductividad térmica**



La cantidad de energía pérdida por cara se resume en la siguiente tabla 5:

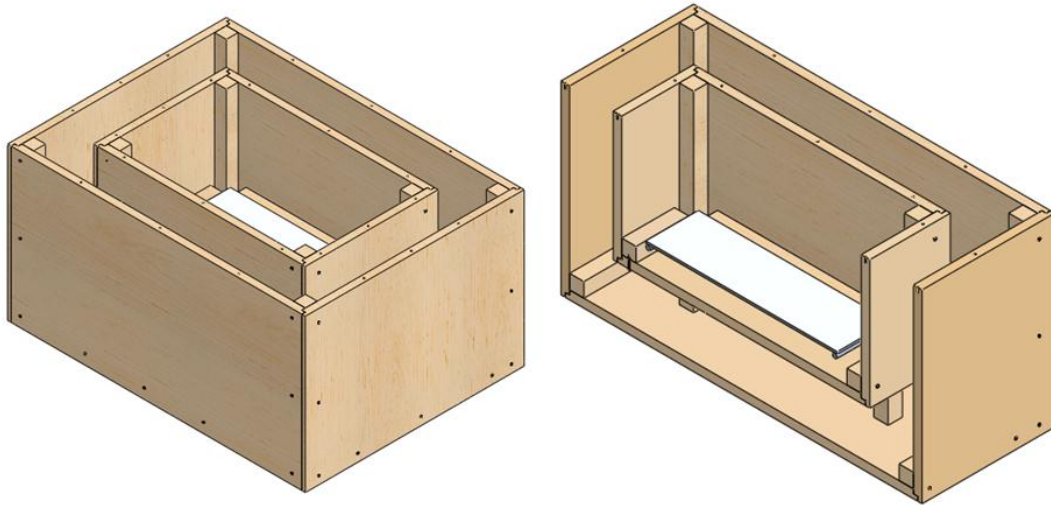
Tabla- 5 Pérdida total de energía del equipo de medición de conductividad térmica

Tipo de Cara	$\dot{Q}_{perdido}(W)$	$\dot{Q}_{perdido\ total}(W)$
Latera	1.576	6.305
Interior	2.280	2.280
<b>Total</b>		8.584

Resultando una pérdida de energía de 8.584 W lo cual es menor a 10W que representa el 1% de pérdida total permisible. Con este se concluye que para una perdida menor al 1% de la potencia suministrada es necesario una capa de 7.6 cm de aislante térmico por lado.

Basados en lo anterior para el diseño del equipo se utilizarán dos contenedores de madera, una de mayor tamaño que el otro; el contenedor de menor tamaño debe ser ubicado en la parte interna del otro. En los espacios laterales e inferior que quedan entre ellos debe ser ubicado el espesor de aislante necesario para asegurar la mínima pérdida de potencia. El contenedor de menor tamaño debe asegurar que pueda ser ubicado el material constructivo de mayor tamaño seleccionado para medición que es de 0.40x0.20x0.20 m, con lo cual el área mínima transversal de este debe ser de 0.40x0.20 m, aunque debe aumentarse para facilitar la colocación del material por parte del operario, cada vez que se utilice un material de menor tamaño debe ser agregado material aislante en el contenedor interno. La resistencia térmica estará en el contenedor de menor tamaño; la superficie inferior de la resistencia debe ser cubierta por aislante para evitar que la madera pueda quemarse.

Teniendo en cuenta lo anterior se obtiene un diseño inicial del equipo, las medidas y las partes del equipo son colocadas en el anexo G.



**Figura 4** Diseño inicial del equipo de medición de conductividad térmica

Se presenta el equipo de medición una vez culminada la etapa de fabricación:



**Figura 5** Equipo de medición de conductividad térmica fabricado

## **Diseño y construcción de sistema de control**

La estrategia de control utilizada es esencial para obtener un desempeño adecuado en el equipo de medición de conductividad térmica. Se propuso el diseño de un circuito para el control de temperatura de un sistema, basado en el control de la potencia disipada por una resistencia térmica utilizada como fuente de calor. Para esto, se implementó un circuito de conmutación activado por una señal de modulación por ancho de pulsos (PWM).

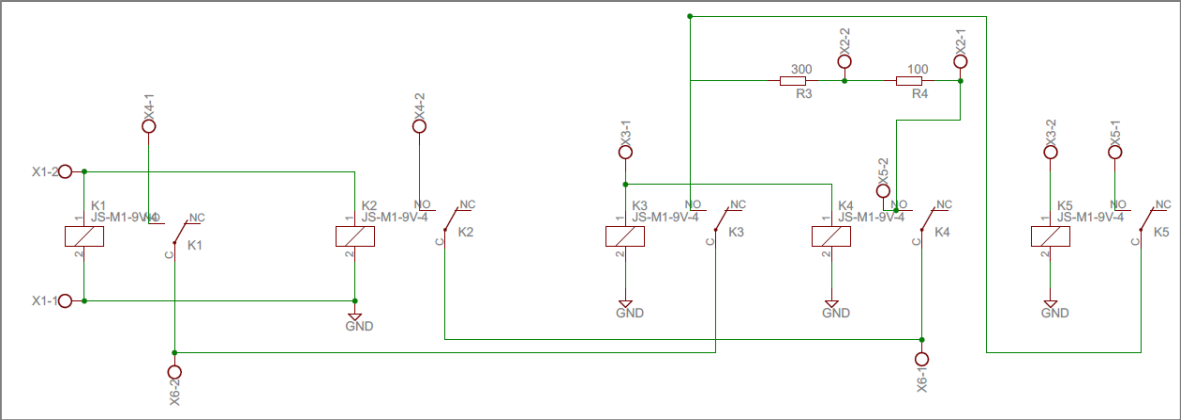
La primera etapa para este proceso de diseño, consistió en caracterizar la resistencia térmica, la cual tiene un valor de  $7,9 \Omega$  y soporta una potencia de 1700 W. Considerando que el sistema final opera en un rango de temperaturas entre  $60^\circ$  y  $100^\circ$  C. Se diseñó un sistema que opera con una señal de alimentación de 50V AC, en una etapa inicial o de pre-calentamiento, que basada en pruebas experimentales garantiza una temperatura en estado estable alrededor de  $70^\circ$  C en aproximadamente 15 min. Esto requiere operar el control de temperatura posterior, con un voltaje de tan solo 30V DC y una corriente que no supera los 4A, trabajando en el rango de temperaturas deseado.

El diseño del circuito debe permitir conmutar la señal de entrada de una señal de 50V AC a una señal de 30V DC, para la etapa de pre-calentamiento y la etapa de control respectivamente. Esto se realiza por medio de un conjunto de relés activados por una señal proveniente de un controlador lógico programable (PLC), que a su vez posee conectividad con una interfaz de LabVIEW en un computador. En la etapa del control de temperatura, la resistencia se conecta a la fuente de voltaje por medio de un relé que conmuta de acuerdo a una señal de entrada modulada por ancho de pulsos. En la Figura 7 se puede observar el esquemático del circuito diseñado.

En el diagrama mostrado, los elementos K1,... , K5, corresponden a los relés utilizados para conmutación, que fueron seleccionados para soportar la corriente y el voltaje de operación del circuito. Los elementos X1-1, X1-2, etc. se refieren a borneras utilizadas en el circuito para las señales de alimentación, de medición, de



activación y en particular X6-1 y X6-2 son los elementos donde se conecta la resistencia térmica.



**Figura 6** Circuito de conmutación de relés, para control de potencia disipada del equipo de medición de conductividad térmica

Este circuito se implementó en una tarjeta de circuito impreso, como se observa en la Figura 7, que se diseñó en la herramienta Eagle considerando la corriente máxima de operación del circuito para el tamaño de las pistas y las reglas generales de diseño de circuitos impresos.

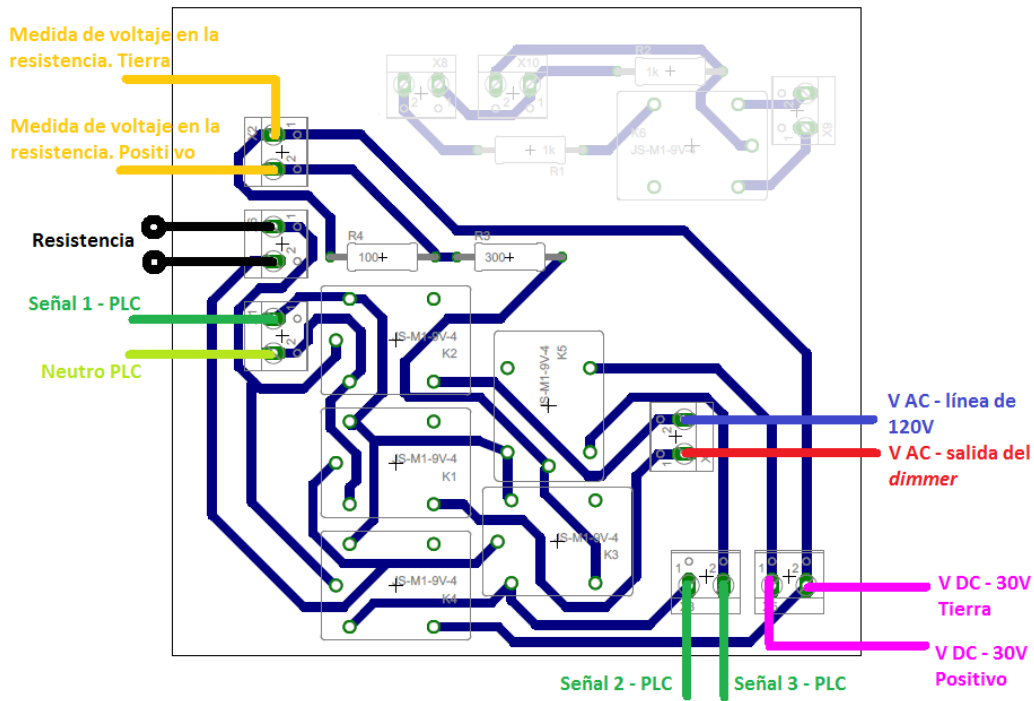


Figura 7 Diseño del circuito impreso en Eagle del equipo de medición de conductividad térmica

La temperatura del sistema es medida por medio de termopares conectados a un módulo del PLC. Se utilizaron 4 termopares uniformemente distribuidos en la superficie de la placa que se utilizan para calentar los bloques de material arquitectónico. Sin embargo, el módulo utilizado no posee suficientes entradas, por lo cual se planteó un circuito de conmutación para capturar la señal de 4 termopares, intercambiando entre un conjunto y otro cada vez, para obtener una medida de cada sensor utilizado a través del tiempo.

Se diseñó un circuito para regulación de voltaje de 24V DC a 12V DC, activado con una señal proveniente del PLC. En la Figura 7, se muestra el esquemático del circuito en el cual se utilizó un divisor de tensión con un arreglo de dos resistencias de igual valor, para entregar la mitad del voltaje a la salida.

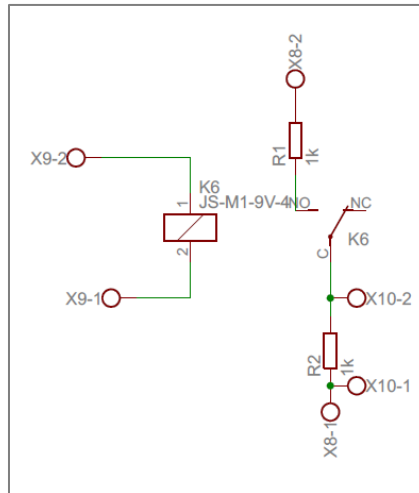


Figura 8 Circuito esquemático de regulación de voltaje del equipo de medición de conductividad térmica

El circuito se implementó en la misma tarjeta impresa del circuito de control. Implementada en Eagle, este circuito resulta como se observa en la figura 9, donde se especifican cada una de las señales de entrada y salidas utilizadas.

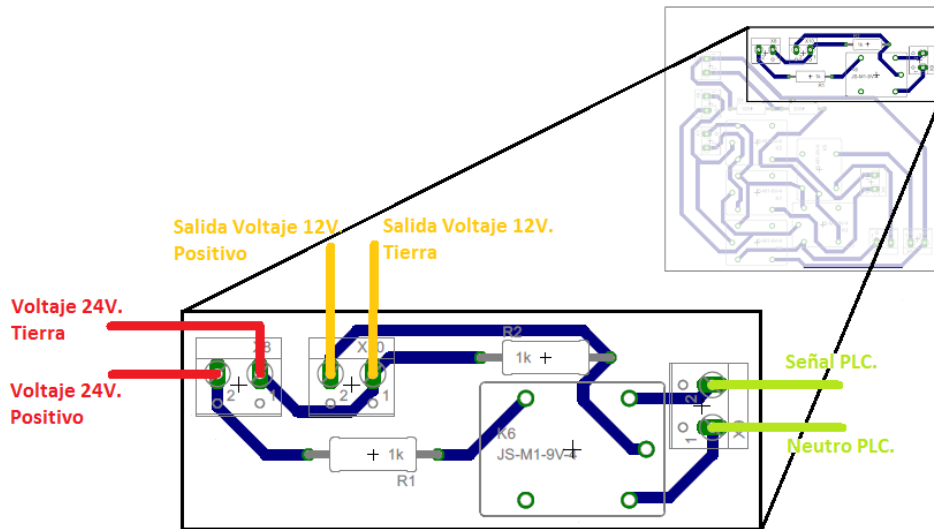


Figura 9 Circuito impreso de regulación de voltaje del equipo de medición de conductividad térmica.

A continuación se presenta de esquema simplificado de la estrategia de control:

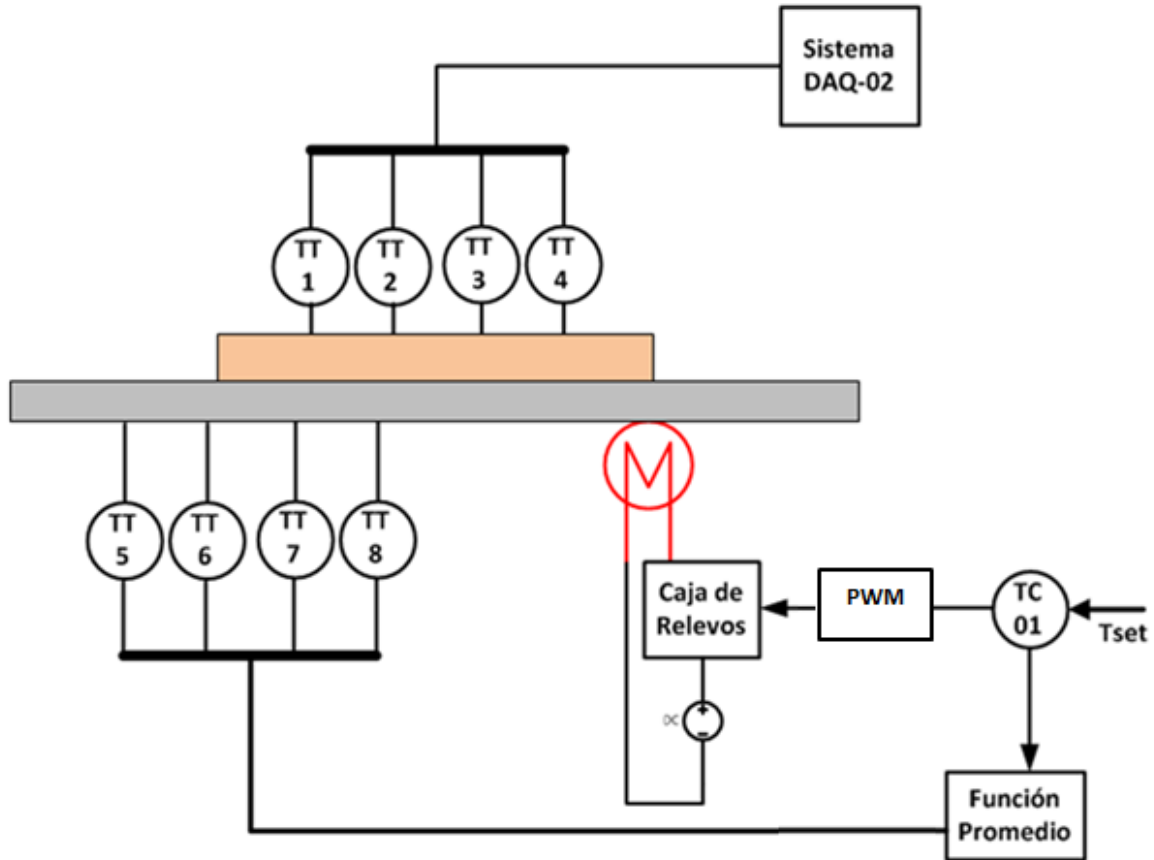


Figura 10 Esquema P&ID del equipo de medición de conductividad térmica

El sistema de control del equipo de medición debe asegurar que la temperatura de la superficie exterior de la placa sobre la resistencia eléctrica sea uniforme y estable. El promedio de la temperatura de la placa será la variable de proceso del sistema de control, el cual debe manipular el tiempo de cierre (activación) del circuito que energiza la resistencia eléctrica por medio de la señal PWM. Se espera que en el momento de alcanzar la estabilización en la temperatura requerida, la potencia suministrada se estabilice, es decir que el ancho de pulso del PWM sea constante; una señal del PWM constante significa que hay un tren de onda de activación específico que conlleva a la estabilización. Como en un ciclo definido hay periodos de apertura y cierre, hay una potencia promedio que suministra la resistencia, la cual se calcula de la Ec.8:

$$\dot{Q} = IV \left( \frac{t}{T} \right) = IV\bar{T} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde  $IV$  es una constante y  $\bar{T}$  es el porcentaje del tiempo que se encuentra activado el circuito de potencia. Es decir, supongamos que la fuente suministra una potencia constante de 10 W ( $IV$ ) y que un ciclo de del PWM está definido en 5 s y en la estabilización se mantiene activado 1s; Esto quiere decir que en promedio la resistencia está disipando el 20% de su potencia, por lo cual se debería alcanzar la misma condición si se utiliza un tren de pulso como el descrito o una fuente fija de 2 W. Lo cual se muestra a continuación:

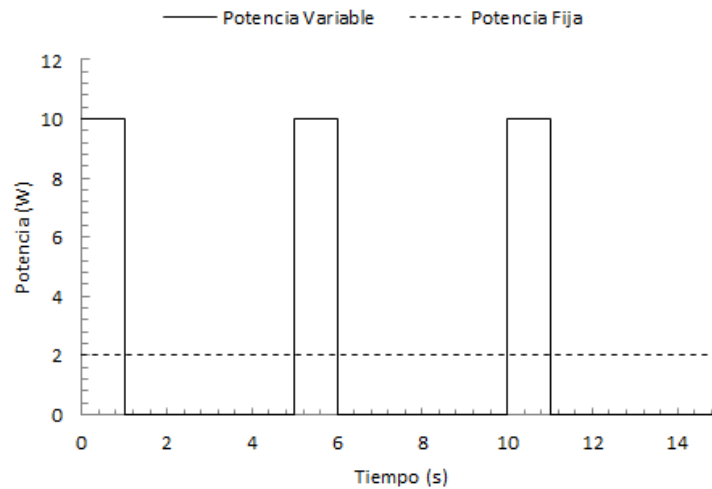


Figura 11 Perfil de potencia disipada por la resistencia del equipo de medición de conductividad térmica

Para verificar que así sea se plantea un modelo de transferencia de calor en estado transitorio que tendrá estos dos tipos de entrada al sistema.

La ecuación diferencia que gobierna este fenómeno es:

$$\frac{d^2T}{dy^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} \quad (\text{Ec. 9})$$

Para resolverla se supone transferencia de calor unidimensional en coordenadas rectangulares y propiedades constantes. Se aplica el método de diferencias finitas y se especifican 4 nodos y se eligen dos para que estén en la superficie del elemento y dos distribuidos en el interior. Los nodos se numeran como 0, 1, 2 y 3:

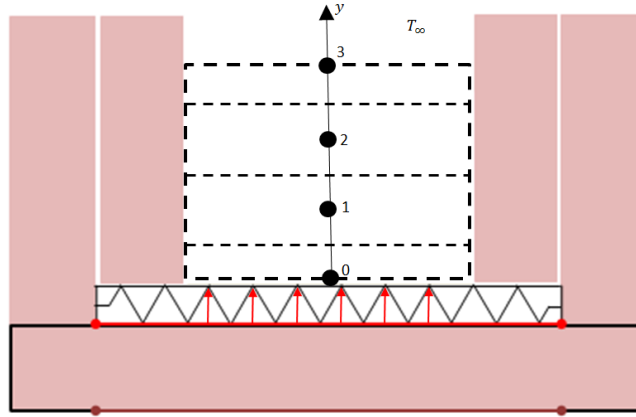


Figura 12 Aproximación en diferencias finitas del material constructivo

Se realizan balances de energía para cada elemento diferencial y se obtiene lo siguiente:

Nodo 0

$$\dot{Q}_{resist}^i + kA \frac{T_1^i - T_0^i}{\Delta y} = (\rho A \Delta y) C \frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 10})$$

Nodo 1

$$kA \frac{T_2^i - T_1^i}{\Delta y} + kA \frac{T_0^i - T_1^i}{\Delta y} = (\rho A \Delta y) C \frac{T_1^{i+1} - T_1^i}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 11})$$

Nodo 2

$$kA \frac{T_3^i - T_2^i}{\Delta y} + kA \frac{T_1^i - T_2^i}{\Delta y} = (\rho A \Delta y) C \frac{T_2^{i+1} - T_2^i}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 12})$$

Nodo 3

$$hA(T_\infty^i - T_3^i) + kA \frac{T_2^i - T_3^i}{\Delta y} = (\rho A \Delta y) C \frac{T_3^{i+1} - T_3^i}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 13})$$

Despejando las temperaturas en los nodos tenemos

$$T_0^{i+1} = \left[ \dot{Q}_{resist}^i + kA \frac{T_1^i - T_0^i}{\Delta y} \right] \frac{\Delta t}{(\rho A \Delta y) C} + T_0^i \quad (\text{Ec. 14})$$

$$T_1^{i+1} = \left[ kA \frac{T_2^i - T_1^i}{\Delta y} + kA \frac{T_0^i - T_1^i}{\Delta y} \right] \frac{\Delta t}{(\rho A \Delta y) C} + T_1^i \quad (\text{Ec. 15})$$

$$T_2^{i+1} = \left[ kA \frac{T_3^i - T_2^i}{\Delta y} + kA \frac{T_1^i - T_2^i}{\Delta y} \right] \frac{\Delta t}{(\rho A \Delta y) C} + T_2^i \quad (\text{Ec. 16})$$

$$T_3^{i+1} = \left[ hA(T_\infty^i - T_3^i) + kA \frac{T_2^i - T_3^i}{\Delta y} \right] \frac{\Delta t}{(\rho A \Delta y) C} + T_3^i \quad (\text{Ec. 17})$$

Suponiendo lo siguiente:

$$k = 0.22 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$$

$$C = 850 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$A = 0.08 m^2$$

$$h = 25 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

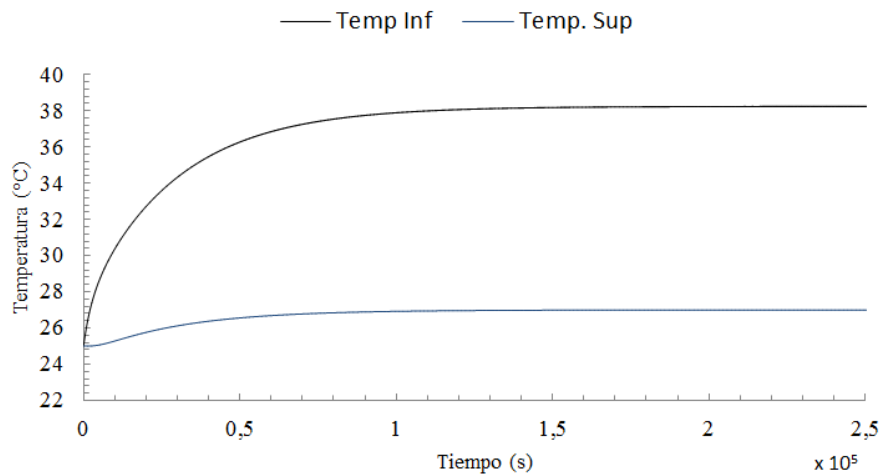
$$\Delta y = 0.03 m$$

$$T_\infty^i = 25 \text{ } ^\circ C$$

$$\rho = 750 \frac{kg}{m^3}$$

$$T_0^i = T_1^i = T_2^i = T_3^i = 25 \text{ } ^\circ C$$

Resolviendo el sistema para las dos entradas de potencia y graficando la temperatura inferior y temperatura superior se tiene lo siguiente:



**Figura 13 Comportamiento de la Temperatura Inferior y Superior para las entradas de potencia del equipo de medición de conductividad térmica**

Con lo anterior se puede identificar que aunque la entrada de potencia es variable, la potencia promedio produce que se llegue a la estabilización y el efecto es similar en los dos casos.

#### 2.2.5.1.2 Corrección del valor de conductividad térmica- Método 1

En el proceso de medición de la conductividad térmica, cuando el material constructivo tiene un área transversal de menor tamaño que la placa sobre la cual se apoya, se adiciona fibra de vidrio en los espacios faltantes para que el calor

disipado por la resistencia eléctrica sea transferido por el material constructivo. Basado en la teoría de la transferencia de calor de forma intuitiva podemos decir que cuando el valor de conductividad del material constructivo es mucho mayor que la del aislante la mayor parte del calor será transferida por el material constructivo, pero cuando sean medidos materiales aislante del orden de conductividad térmica del aislante utilizado en la prueba el valor del calor transferido por el material analizado no será el total disipado por la resistencia. De igual manera el porcentaje del área que ocupa el material con respecto a la placa y el espesor del material deben influenciar en la cantidad de calor transferida por el material.

Se plantea a continuación un modelo matemático que relaciona las características geométricas del material constructivo con el porcentaje de calor transferido por el material.

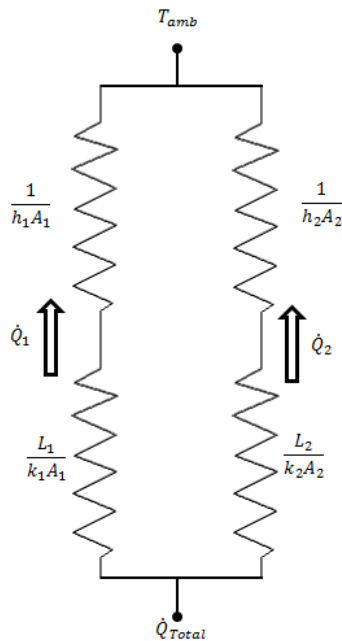


Figura 14 Modelo de resistencia térmica del equipo de medición de conductividad térmica

El calor total disipado por la placa es igual al calor transferido por el material constructivo y el calor transferido por el aislante.

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 \quad (\text{Ec. 18})$$



El área total de la placa es ocupada por el material y el aislante térmico

$$A_T = A_1 + A_2 \quad (\text{Ec. 19})$$

La resistencia térmica total del aislante térmico está determinada por una resistencia por conducción y una resistencia convectiva.

$$R_{1T} = R_{1\text{ cond}} + R_{1\text{ conv}} \quad (\text{Ec. 20})$$

$$R_{1\text{ cond}} = \frac{L_1}{k_1 A_1} = \frac{L_1}{k_1 \left[1 - \frac{A_2}{A_T}\right] A_T} \quad (\text{Ec. 21})$$

$$R_{1\text{ conv}} = \frac{1}{h \left[1 - \frac{A_2}{A_T}\right] A_T} \quad (\text{Ec. 22})$$

La resistencia térmica total del material constructivo está determinada por una resistencia por conducción y una resistencia convectiva.

$$R_{2T} = R_{2\text{ cond}} + R_{2\text{ conv}} \quad (\text{Ec. 23})$$

$$R_{2\text{ cond}} = \frac{L_2}{k_2 A_2} = \frac{L_2}{k_2 \left[\frac{A_2}{A_T}\right] A_T} \quad (\text{Ec. 24})$$

$$R_{2\text{ conv}} = \frac{1}{h \left[\frac{A_2}{A_T}\right] A_T} \quad (\text{Ec. 25})$$

La resistencia total del conjunto material aislante está determinada por:

$$R_T = \frac{R_{1T} R_{2T}}{R_{1T} + R_{2T}} \quad (\text{Ec. 26})$$

El calor total transferido es igual a la diferencia de temperatura entre la resistencia total.

$$\dot{Q}_T = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (\text{Ec. 27})$$

Obtenemos el valor de la temperatura en la placa en función de la resistencia total, el calor transferido y la temperatura ambiente

$$T_{(o)} = \dot{Q}_T R_T + T_{amb} \quad (\text{Ec. 28})$$

El calor transferido por el aislante está dado por:

$$\dot{Q}_1 = \frac{T_{(o)} - T_{amb}}{R_{1T}} \quad (\text{Ec. 29})$$

El calor transferido por el material constructivo está dado por:

$$\dot{Q}_2 = \frac{T_{(o)} - T_{amb}}{R_{2T}} \quad (\text{Ec. 30})$$

Reemplazando el valor recursivo de la temperatura en la placa:

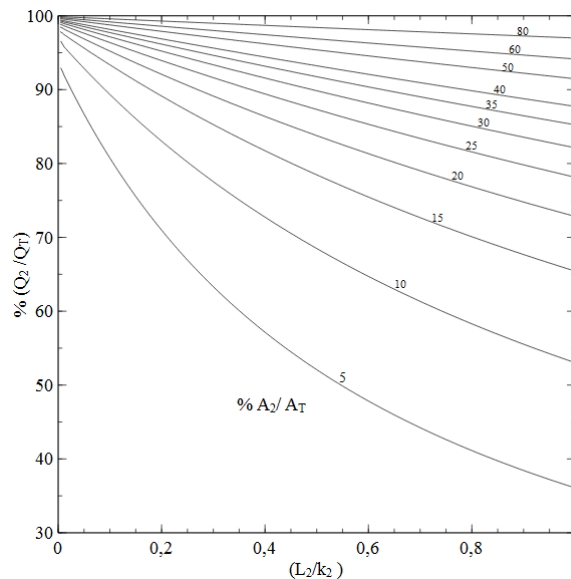
$$\dot{Q}_2 = \frac{[\dot{Q}_T R_T + T_{amb}] - T_{amb}}{R_{2T}} = \frac{\dot{Q}_T R_T}{R_{2T}} \quad (\text{Ec. 31})$$

Se obtiene una relación para el porcentaje de calor conducido por el material medido respecto al total disipado por la resistencia térmica:

$$\frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_T} = \frac{R_T}{R_{2T}} \quad (\text{Ec. 32})$$

$$\frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_T} = \frac{\frac{R_{1T} R_{2T}}{R_{1T} + R_{2T}}}{R_{2T}} = \frac{R_{1T}}{R_{1T} + R_{2T}} \quad (\text{Ec. 33})$$

Se gráfica la anterior ecuación variando el porcentaje de área que ocupa el material medido y la relación longitud sobre conductividad térmica del material medido. Como se puede ver en **Figura 15** es necesario conocer la conductividad térmica del material para determinar el porcentaje del calor conducido. Como inicialmente no se conoce el valor de la propiedad se realiza una corrección de la medición realizada.



**Figura 15** Porcentaje de calor transferido al material constructivo

Cuando se determina la conductividad térmica de un material se asume que el calor total disipado por la resistencia térmica es conducido por el material, obteniendo un valor de conductividad térmica cercano al real pero que no tiene en cuenta lo descrito:

$$\dot{Q}_T = k_{pract} \frac{A_2 \Delta T}{L_2} \quad (\text{Ec. 34})$$

$$\frac{\dot{Q}_T L_2}{k_{pract}} = A_2 \Delta T \quad (\text{Ec. 35})$$

Como se ha identificado una porción del calor total es conducido por el material de construcción, si planteamos la ecuación de conducción teniendo en cuenta

$$\dot{Q}_2 = k_2 \frac{A_2 \Delta T}{L_2} \quad (\text{Ec. 36})$$

$$\frac{\dot{Q}_2 L_2}{k_2} = A_2 \Delta T \quad (\text{Ec. 37})$$

Igualando

$$\frac{\dot{Q}_T L_2}{k_{pract}} = \frac{\dot{Q}_2 L_2}{k_2} \quad (\text{Ec. 38})$$

La corrección del valor de la conductividad con respecto al valor real es igual a la proporción del calor que gana el material respecto al calor total

$$\frac{1}{k_{pract}} = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_T} \frac{1}{k_2} \quad (\text{Ec. 39})$$

Reemplazando los términos conocidos y despejando la conductividad real

$$\frac{1}{k_{pract}} = \frac{R_{1T}}{R_{1T} + R_{2T}} \frac{1}{k_2} \quad (\text{Ec. 40})$$

$$\frac{1}{k_{pract}} = \frac{R_{1T}}{R_{1T} + \left[ \frac{L_2}{k_2 \left[ \frac{A_2}{A_T} \right] A_T} + \frac{1}{h \left[ \frac{A_2}{A_T} \right] A_T} \right]} \frac{1}{k_2} \quad (\text{Ec. 41})$$

$$\frac{1}{k_{pract}} = \frac{R_{1T}}{k_2 \left[ R_{1T} + \frac{1}{h \left[ \frac{A_2}{A_T} \right] A_T} \right] + \frac{L_2}{h \left[ \frac{A_2}{A_T} \right] A_T}} \quad (\text{Ec. 42})$$

$$\frac{1}{k_{pract}} \left( k_2 \left[ R_{1T} + \frac{1}{h \left[ \frac{A_2}{A_T} \right] A_T} \right] + \frac{L_2}{h \left[ \frac{A_2}{A_T} \right] A_T} \right) = R_{1T} \quad (\text{Ec. 43})$$

$$k_2 = \frac{R_{1T}}{\left[ R_{1T} + \frac{1}{h \left[ \frac{A_2}{A_T} \right] A_T} \right]} k_{pract} - \frac{\frac{L_2}{h \left[ \frac{A_2}{A_T} \right] A_T}}{\left[ R_{1T} + \frac{1}{h \left[ \frac{A_2}{A_T} \right] A_T} \right]} \quad (\text{Ec. 44})$$

Se presenta la ecuación para corregir el valor encontrado de la conductividad

$$k_2 = \left( \frac{R_{1T}}{\left[ R_{1T} + \frac{1}{h \left[ \frac{A_2}{A_T} \right] A_T} \right]} k_{pract} - \frac{\frac{L_2}{h \left[ \frac{A_2}{A_T} \right] A_T}}{\left[ R_{1T} + \frac{1}{h \left[ \frac{A_2}{A_T} \right] A_T} \right]} \right) \quad (\text{Ec. 45})$$

Se grafica la anterior ecuación reorganizándola de la siguiente forma para relacionar 3 variables:

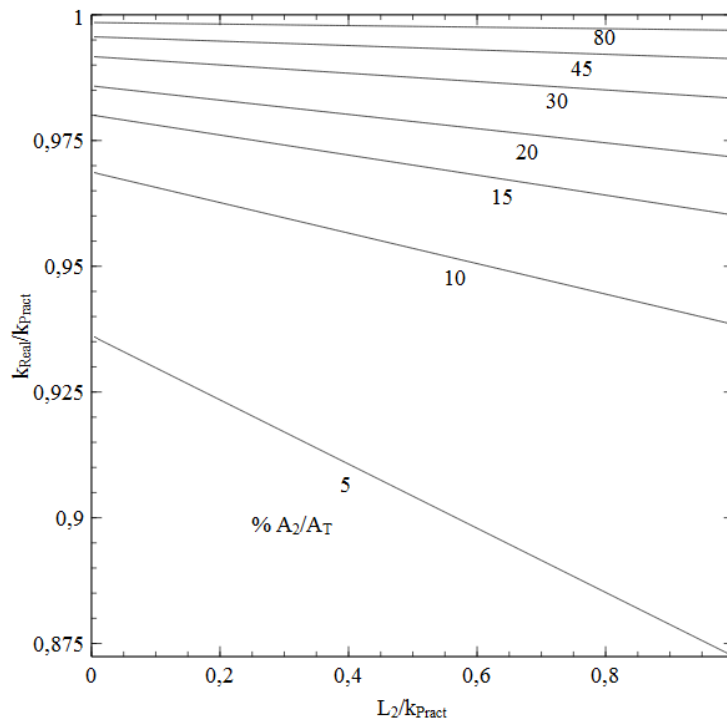


Figura 16 Corrección del valor de conductividad térmica dado por el equipo de medición de conductividad térmica

### 2.2.5.2 Método 2

Como se evidencia en la Figura 15 y Figura 16 cuando la conductividad térmica del material a medir es baja como en los aislantes térmicos usados en las construcciones, el valor de la conductividad térmica medido con el método 1

presenta un error apreciable de máximo 13% calculado teóricamente. Aunque se presentan gráficas para corregir la incidencia que tiene el valor medido por el equipo, se presenta un método alternativo para verificar el valor real de la propiedad.

Para este método se debe realizar una caja del material aislante a medir (6 lados), se debe agregar agua a 70°C al interior, en caso que el material aislante no permita el paso de agua del interior al exterior se agrega de forma directa, si permite el paso el agua debe ser agregada en una bolsa plástica que por su pequeño espesor es de conductividad despreciable, el volumen agregado de agua depende del tamaño del recipiente que lo contenga, debido a que el fluido debe ocupar la mayor parte posible de la cavidad interna, esto para que el intercambio de calor se dé entre el fluido y las paredes de la cavidad y no con un gran porcentaje del aire en el interior de esta.

La temperatura del agua al interior se monitorean de forma continua, las mediciones de la temperatura al interior se realizan en puntos a distintas alturas. Se monitorean además las temperaturas de cuatro caras de la caja.

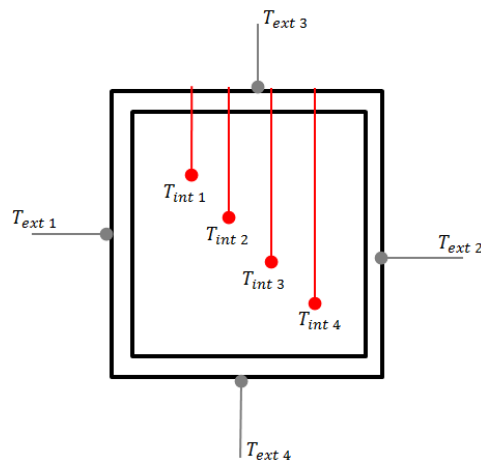


Figura 17 Distribución de sensores de temperatura en método 2 para medición de conductividad térmica

La cantidad de calor que cede el agua en un tiempo determinado es ganado por las paredes del recipiente. Como se monitorean las temperaturas de la superficie externa de las paredes del recipiente se puede plantear un balance de energía entre el fluido y el recipiente.

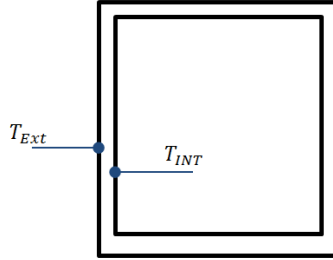


Figura 18 Promedio de temperatura realizado en análisis del método 2 para medición de conductividad térmica

La temperatura exterior se promedia de las cuatro temperaturas medidas al exterior del recipiente y la temperatura interior se promedia de las cuatro de la parte interna.

El balance de energía que es el siguiente:

$$m_{agua}C_{p-agua} \frac{\Delta T_{agua}}{t} = 2 \left( \frac{kA_{lateral\ 1}\Delta T}{L_1} \right) + 2 \left( \frac{kA_{lateral\ 2}\Delta T}{L_2} \right) + \left( \frac{kA_{sup}\Delta T}{L_{sup}} \right) + \left( \frac{kA_{inf}\Delta T}{L_{inf}} \right) \quad (\text{Ec. 46})$$

Despejando la conductividad térmica tenemos:

$$k = \frac{m_{agua}C_{p-agua} \frac{\Delta T_{agua}}{t}}{2 \left( \frac{A_{lateral\ 1}\Delta T}{L_1} \right) + 2 \left( \frac{A_{lateral\ 2}\Delta T}{L_2} \right) + \left( \frac{A_{sup}\Delta T}{L_{sup}} \right) + \left( \frac{A_{inf}\Delta T}{L_{inf}} \right)} \quad (\text{Ec. 47})$$

### 2.2.5.3 Prueba piloto

Los dos métodos propuestos para la medición de la conductividad térmica serán colocados a prueba usando un mismo material y comparando las respuestas dadas. En esta etapa se tendrá en cuenta el valor al que conlleva la medición y su comparación por lo dicho en la literatura, la facilidad de realizar la prueba y la estabilidad de la respuesta dada por el método.

#### 2.2.5.3.1 Método 1

Para evaluar el comportamiento del equipo de medición diseñado en este método se utiliza una pieza de Poliestireno expandido de  $0.17 \times 0.15 \times 0.016 \text{ m}$ .

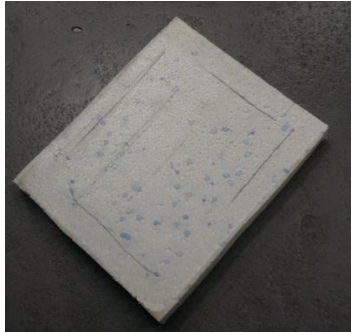


Figura 19 Pieza de poliestireno para prueba piloto del método 1

Se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto al comportamiento de la temperatura inferior y superior, la potencia disipada y la conductividad térmica:

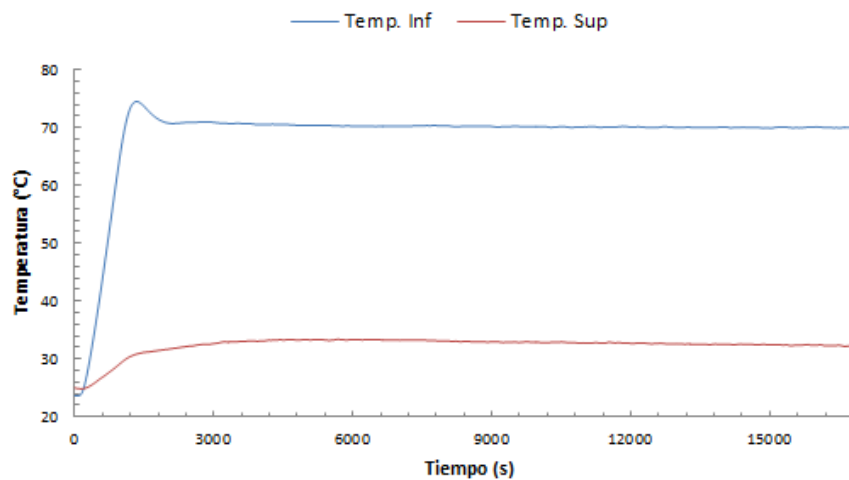


Figura 20 Comportamiento de la temperatura inferior y superior del material evaluado usando el método 1

Las temperaturas en las dos superficies del material evaluado llegan al equilibrio térmico como se esperaba.

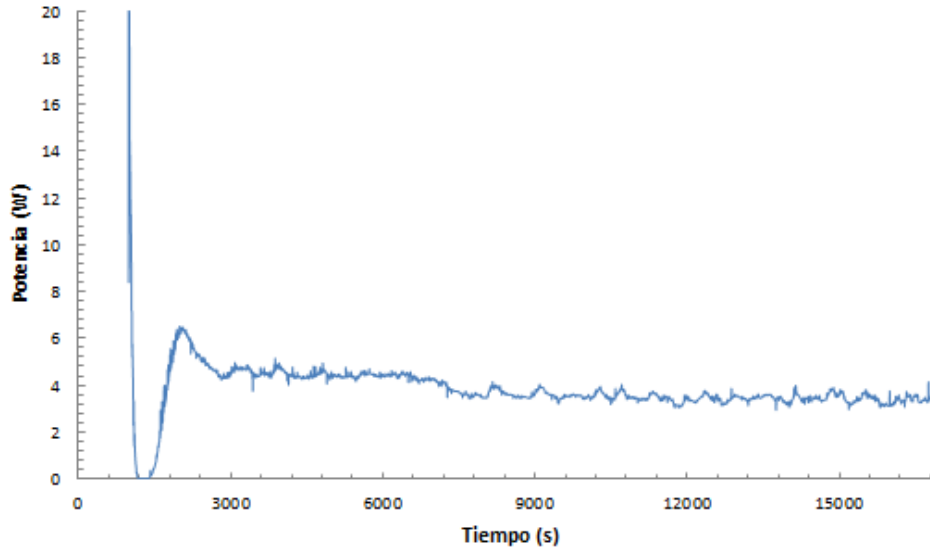


Figura 21 Comportamiento de la potencia disipada en prueba piloto del método 1

La potencia disipada por la resistencia llega a una estabilización, es decir que el PWM posee un ancho de pulso fijo al final de la prueba.

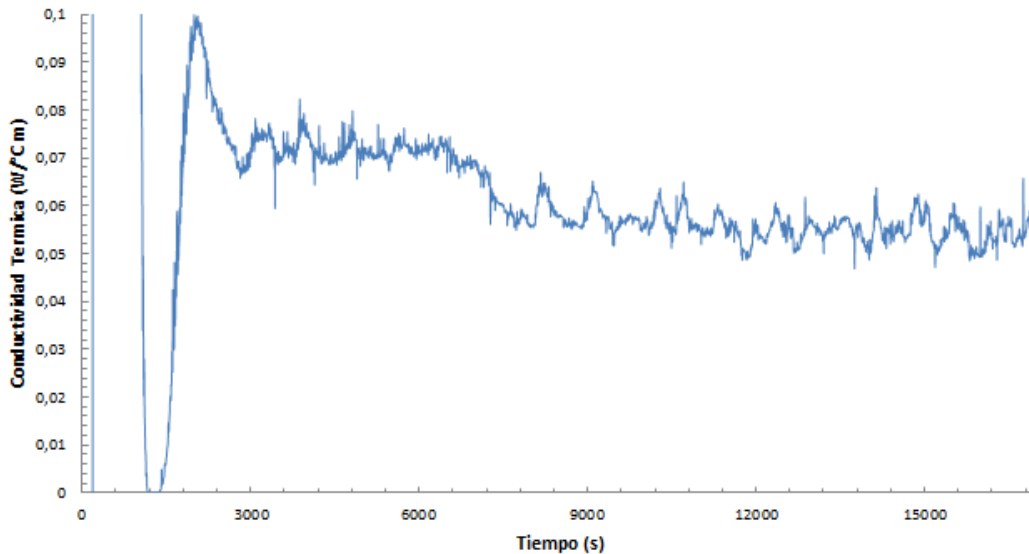


Figura 22 Comportamiento de la conductividad térmica del poliestireno utilizando el método 1

La conductividad térmica busca estabilizarse en un valor medio de  $0.05539 \frac{W}{m^{\circ}C}$ , lo cual está en el rango que usualmente se encuentra este tipo de material.



### 2.2.5.3.2 Método 2

Para este método se utiliza una caja de poliestireno expandido y se adecua de la siguiente manera:

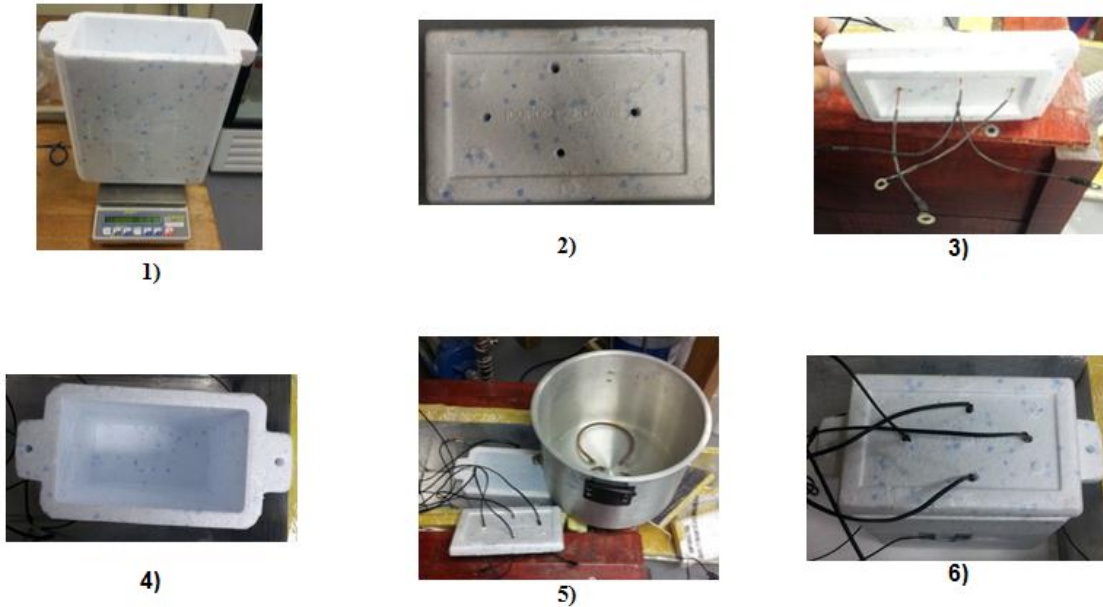


Figura 23 Adecuación de recipiente en el método 2

- 1) Determinar la masa del recipiente a usar
- 2) Realizar 4 cavidades en la parte superior del recipiente por donde ingresarán los sensores de temperatura.
- 3) Ubicar los sensores de temperatura en la parte interna
- 4) Ubicar los sensores de temperatura de contacto en las superficies laterales del recipiente
- 5) Calentar agua, y adicionar al recipiente del análisis con cuidado para evitar riesgos de quemaduras.
- 6) Iniciar la medición de la prueba. El programa utilizado es el mismo del equipo de medición de conductividad térmica.

Se grafica a continuación el comportamiento de la temperatura interna y de la temperatura externa del recipiente.

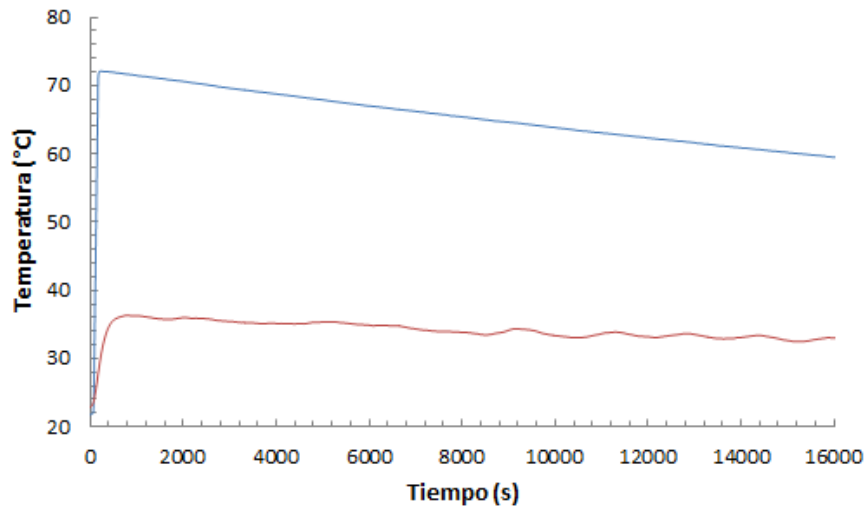


Figura 24 Comportamiento del promedio de la temperatura interna y externa del recipiente usando el método 2

Se encontró que el la variación de la temperatura entre las superficies externas e internas del recipiente no se mantiene constante como se esperaba, lo cual se le atribuye a variaciones en la temperatura del medio y al no mantenerse la temperatura constante podría variar los valores de conductividad térmica.

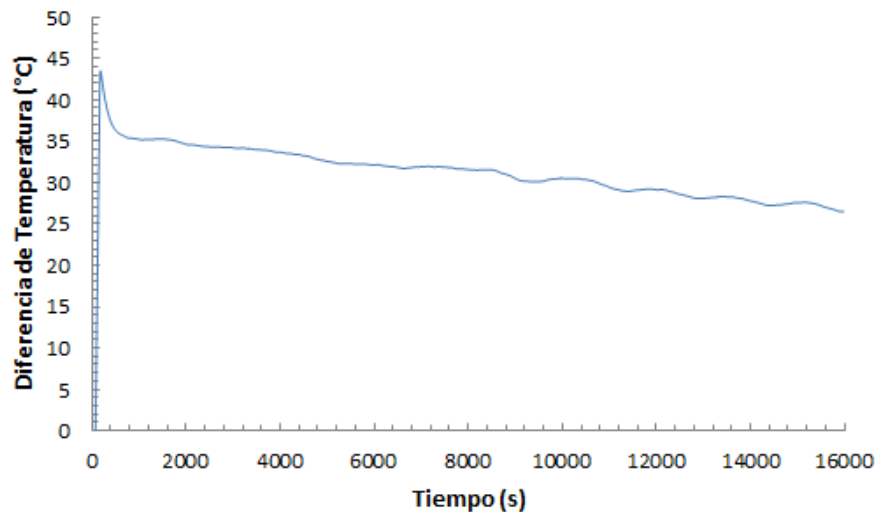


Figura 25 Comportamiento de la diferencia de temperatura entre las dos superficies del recipiente usando el método 2

Por tal motivo se determina como es el comportamiento de la conductividad térmica durante la prueba.

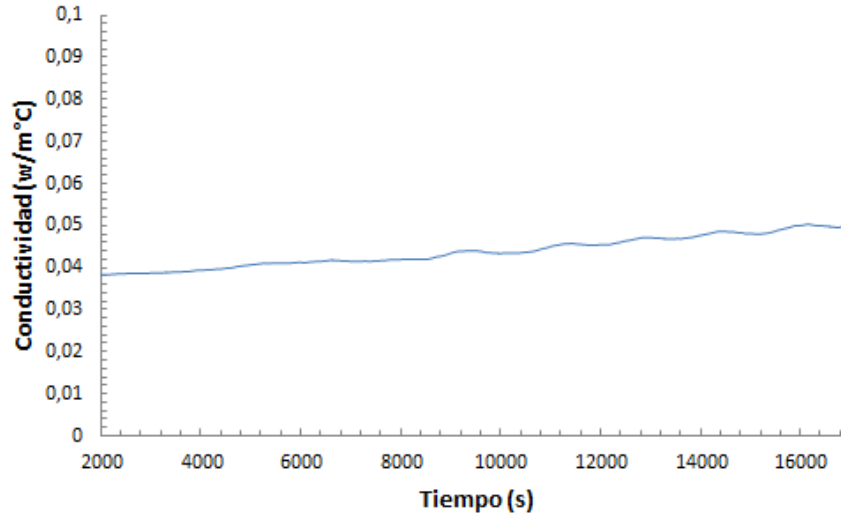


Figura 26 Comportamiento de la conductividad térmica del poliestireno por el método 2

Como se puede ver el rango en el cual se mueve la prueba está entre 0.04 a 0.05  $\frac{w}{m^{\circ}C}$ , lo cual es cercano al valor que encontrado por el método 1, pero a diferencia este método presenta gran variación en su valor.

*Por lo anterior para la medición de la conductividad térmica se selecciona el método 1.*

### 2.2.6 Resistencia Térmica

Es un valor de uso común en cálculos de acondicionamiento de aire, representa la capacidad del material de oponerse al flujo de calor y está definido como:

$$R = \frac{L}{k} \quad (\text{Ec. 48})$$

Donde L es el espesor del material evaluado y k la conductividad equivalente del material.

### 2.2.7 Calor específico

En la práctica se puede diferenciar que cada material almacena calor en forma diferente y se ha definido la propiedad de calor específico  $C_p$  como una medida de la capacidad de un material para almacenar energía térmica. Para la determinación del calor específico se presentan dos métodos.

### 2.2.7.1 Metodo1

Como se mencionó anteriormente el calor específico nos permite determinar la cantidad de energía que un cuerpo puede almacenar. La cantidad de energía que un cuerpo gana o pierde debido a variación de su temperatura está determinada por un balance de energía en el cuerpo:

$$Q = mC\Delta T \quad (\text{Ec. 49})$$

Para este análisis se utiliza dicho principio, inicialmente se calientan el material en análisis a una temperatura conocida en nuestro caso 200°C. Se agrega una cantidad conocida de agua en un calorímetro de tamaño tal que permita colocar en su interior el material en análisis. Cuando el material en análisis adquiera la temperatura deseada de 200 °C, se ingresa en el calorímetro y se monitorea la temperatura hasta que el material y el agua lleguen a equilibrio térmico.

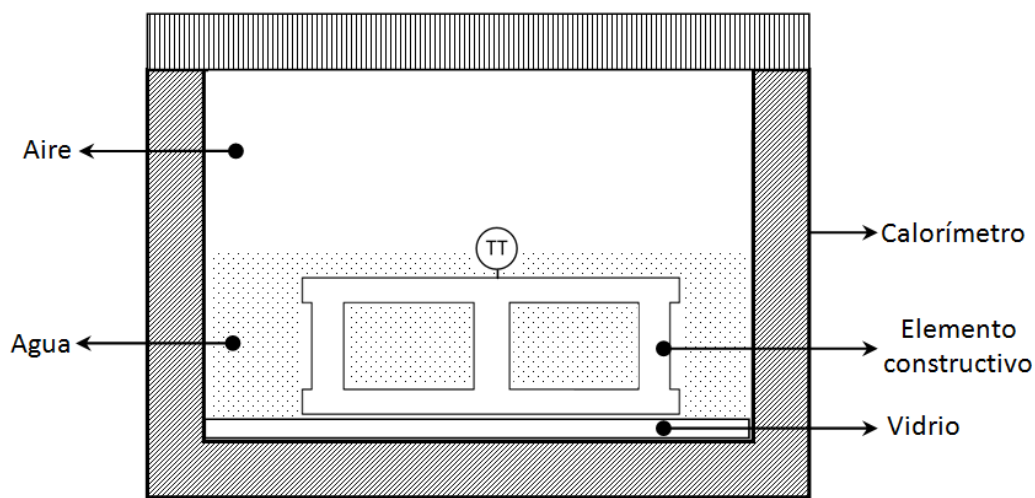


Figura 27 Esquema de prueba para determinar calor específico, método 1

Se asumirá que la temperatura del aire es igual a la temperatura de equilibrio, para tener en cuenta el intercambio de calor con esta sustancia. El balance de energía en el sistema cerrado, conformado por el material constructivo, el agua y el aire está dado por:

$$Q_{perdido} = Q_{ganado} \quad (\text{Ec. 50})$$

$$Q_{elemento} = Q_{agua} + Q_{aire} \quad (\text{Ec. 51})$$

$$[mC(T_i - T_f)]_{elemento} = [mC(T_f - T_i)]_{agua} + [mC(T_f - T_i)]_{aire} \quad (\text{Ec. 52})$$

$$C_{elemento} = \frac{[mC(T_f - T_i)]_{agua} + [mC(T_f - T_i)]_{aire}}{[m(T_i - T_f)]_{elemento}} \quad (\text{Ec. 53})$$

En este análisis no se consideran pérdidas con algún medio externo, por este motivo debe usarse como contenedor un recipiente de baja conductividad térmica para minimizar la transferencia de calor hacia exterior.

### **2.2.7.2 Método 2**

Cuando la densidad del material analizado es mucho menor que la densidad del medio de referencia, en el caso del agua en el método 1. La cantidad de calor ganado por el material es tan baja que al ingresarse al calorímetro no incrementa de forma significativa la temperatura del medio. El sensor de temperatura no posee una lectura confiable de la medición, ya que esta podría confundirse con la incertidumbre propia del sensor; para esto deben buscarse métodos alternos que permita medir el calor específico de materiales constructivos de baja densidad como lo son los aislantes térmicos.

Consideremos la conducción de calor unidimensional en régimen transitorio en un material constructivo de espesor  $L$  sin generación de calor y con conductividad térmica constante, con un tamaño de malla de  $\Delta x = L/M$  y los nodos 0 y 1 ( $M$ ) en la dirección  $y$ , como se muestra en la figura. Puesto que el elemento de volumen del nodo 0 comprende conducción de calor del nodo 1 y adición de calor por parte de la resistencia térmica, la formulación en régimen transitorio para el nodo exterior 0, se expresa de la siguiente manera:

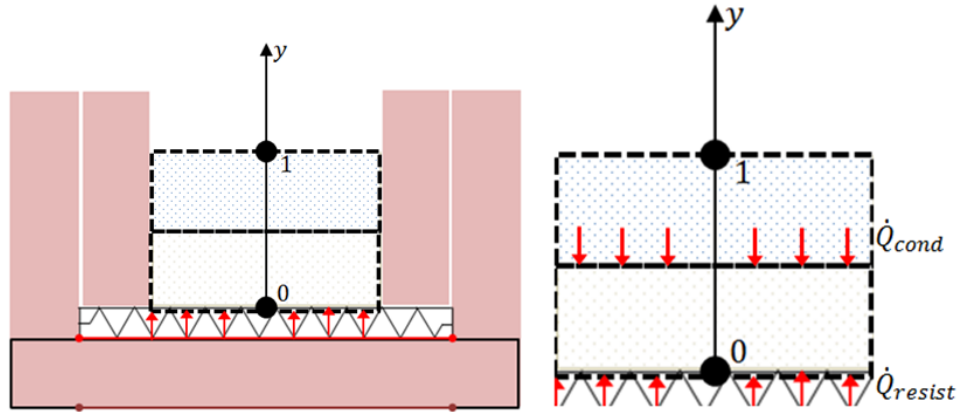


Figura 28 Aproximación en diferencias finitas para determinar calor específico, método 2

$$\left( \begin{array}{c} \text{Calor transferido hacia} \\ \text{el elemento de volumen} \\ \text{desde todas sus superficies} \\ \text{durante } \Delta t \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Calor generado} \\ \text{dentro del elemento} \\ \text{de volumen} \\ \text{durante } \Delta t \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Cambio en el contenido} \\ \text{de energía interna} \\ \text{del elemento de volumen} \\ \text{durante } \Delta t \end{array} \right)$$

$$\dot{Q}_{resist} + \dot{Q}_{cond_{1-0}} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 54})$$

$$\dot{Q}_{resist}^i + kA \frac{T_1^i - T_0^i}{\Delta y} = \left( \frac{\rho \Delta y}{2} \right) C \frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 55})$$

$$\frac{\Delta y}{kA} \dot{Q}_{resist}^i + T_1^i - T_0^i = \frac{\rho C \Delta y^2}{2k \Delta t} (T_0^{i+1} - T_0^i) \quad (\text{Ec. 56})$$

Donde  $\alpha = k/\rho C$  es la difusividad térmica aparente del material constructivo

$$\frac{\Delta y}{kA} \dot{Q}_{resist}^i + T_1^i - T_0^i = \frac{\Delta y^2}{2\alpha \Delta t} (T_0^{i+1} - T_0^i) \quad (\text{Ec. 57})$$

Ahora se define el número discreto adimensional de Fourier

$$\tau = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta y^2} \quad (\text{Ec. 58})$$

La ecuación obtenida se conoce como formulación explícita en diferencias finitas

$$\frac{\Delta y}{kA} \dot{Q}_{resist}^i + T_1^i - T_0^i = \frac{1}{2\tau} (T_0^{i+1} - T_0^i) \quad (\text{Ec. 59})$$

Utilizando el equipo de conductividad térmica podemos inducir un flujo de calor constante en la parte inferior del material ubicado en la parte interna del equipo y monitorear la temperatura en la parte inferior y la parte superior del material constructivo, obteniendo una tabla como la siguiente:

$$\begin{matrix} \mathbf{t} & \mathbf{T_0} & \mathbf{T_1} \\ i & T_{0i} & T_{1i} \\ i + 1 & T_{0(i+1)} & T_{1(i+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ i + n & T_{0(i+n)} & T_{1(i+n)} \end{matrix}$$

Despejando el número de Fourier de la ecuación obtenida, podemos despejar la difusividad térmica del material.

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{(T_0^{i+1} - T_0^i)}{(T_1^i - T_0^i) + \frac{\Delta y}{kA} \dot{Q}_{resist}^i} \quad (\text{Ec. 60})$$

$$C_p = \frac{k}{\rho} \left[ \left( \frac{\Delta y^2}{2\Delta t} \right) \left( \frac{(T_0^{i+1} - T_0^i)}{(T_1^i - T_0^i) + \frac{\Delta y}{kA} \dot{Q}_{resist}^i} \right) \right]^{-1} \quad (\text{Ec. 61})$$

Si se analizan los dos primeros datos de la tabla podemos despejar un valor de calor específico, luego si se analizan el 2 y el dato 3 de la misma se obtiene otro valor de difusividad en el tiempo, de esta forma se obtienen n-1 datos de calor específico, se espera que tiendan a un valor constante

### 2.2.7.3 Método 3

Este método es similar al método 1 con la única diferencia que no se usa agua como medio para que se dé la transferencia de calor, sino que se usa aire. De este modo la densidad del medio es menor que la del material constructivo siendo apreciable la variación de temperatura.

El balance de energía en el sistema conformado por el material constructivo y el aire es el siguiente:

$$Q_{elemento} = Q_{aire} \quad (\text{Ec. 62})$$

$$[mC(T_i - T_f)]_{elemento} = [mC(T_f - T_i)]_{aire} \quad (\text{Ec. 63})$$

$$C_{elemento} = \frac{[mC(T_f - T_i)]_{aire}}{[m(T_i - T_f)]_{elemento}} \quad (\text{Ec. 64})$$

#### 2.2.7.3.1 Prueba piloto

Para la medición de calor específico de los materiales constructivos será utilizado el método 1, el cual es usualmente usado para este tipo de material debido al rango en que posiblemente se darán los calores específicos y por la densidad de los materiales constructivos. Los dos métodos también descritos son métodos

alternos para determinar el calor específico de aquellos materiales que poseen baja densidad como lo son los materiales aislantes.

### 2.2.7.3.1.1 Método 1

Como ya fue descrito para este método se calienta el material constructivo hasta una temperatura dada y posteriormente se deposita en un calorímetro que contiene agua y se monitorea la temperatura hasta alcanzar una temperatura de equilibrio. A continuación se indican los pasos descritos:



Figura 29 Pasos para medición de calor específico usando el método 1

Inicialmente fue medido el calor específico del Ladrillo común obteniendo los siguientes resultados:

Material Constructivo	Agua		Aire		Material constructivo			
	Temperatura Inicial (°C)	Masa (kg)	Altura (cm)	Masa (kg)	Temperatura Inicial (°C)	Masa (kg)	Temperatura Final (°C)	Calor específico (kJ/kg °C)
Ladrillo Común 17x8x4 cm	31	4	21	0.026	200	0.840	36.8	709



El valor obtenido se maneja en el rango de medición de este tipo de material constructivo según la literatura (700-800 kJ/kg °C).

### 2.2.7.3.1.2 Método 2

Este método fue aplicado a una muestra de poliestireno expandido de  $0.4 \times 0.2 \times 0.028 \text{ cm}$ . La muestra fue sometida a una potencia fija de casi  $114 \text{ W}$ , obteniendo el siguiente comportamiento en la temperatura de la superficie inferior y superior.

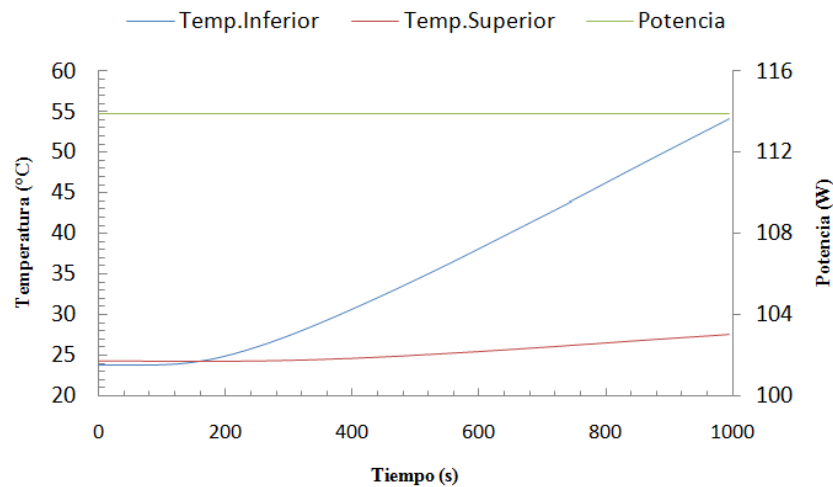


Figura 30 Distribución de temperatura en las superficies bajo una potencia constante usando el método 2

Partiendo del resultado obtenido en el comportamiento de la temperatura se resuelve la ecuación diferencial que describe el fenómeno en estado transitorio media una aproximación con dos nodos.

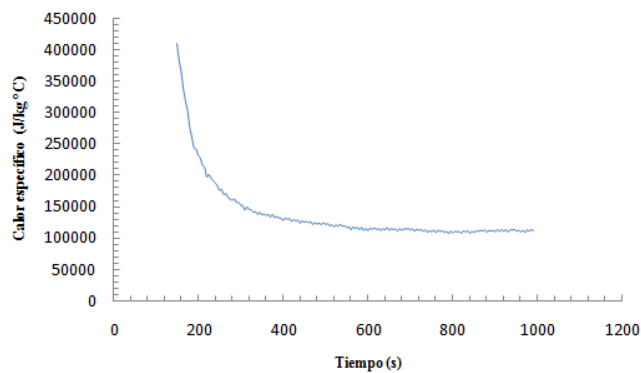


Figura 31 Comportamiento del calor específico del poliestireno expandido aplicando el método 2

Como se evidencia el calor específico tiende a un valor pero este se encuentra muy alejado del valor que la literatura relaciona para este tipo de material. Este método es descartado por lo mencionado y por la baja cantidad de nodos con la que se realiza la aproximación.

### 2.2.7.3.1.3 Método 3

Para la realización de este método fue calentado un fragmento de fibra de vidrio de 80 g hasta  $100^{\circ}\text{C}$ . Posteriormente un calorímetro fue adecuado para monitorear la temperatura del aire interno. Una vez la fibra de vidrio alcanzó la temperatura, se introdujo en el recipiente y se monitoreó el aumento de la temperatura del aire interno del calorímetro.



Figura 32 Montaje para medición de calor específico usando el método 3

El comportamiento de la temperatura del aire interno del calorímetro es el siguiente:

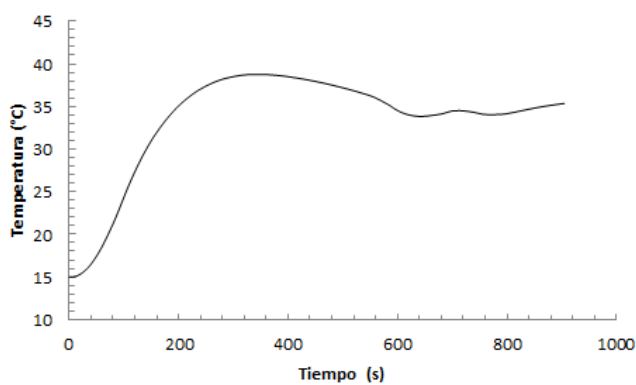


Figura 33 Comportamiento del aire interno del calorímetro

Con lo anterior se obtuvo que el calor específico de la fibra de vidrio es  $9.263 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$  lo cual se encuentra alejado del valor usado en la literatura tomado como referencia.

Por lo anterior el método es descartado para la medición de calor específico en material de baja densidades.

### **2.2.8 Difusividad térmica**

Como se puede notar en la sección 2.2.7.2 una propiedad de los materiales que aparece en el análisis de la conducción del calor en régimen transitorio es la difusividad térmica, la cual representa cuán rápido se difunde el calor por un material y se define como:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{Ec. 65})$$

Como se ha mencionado la conductividad térmica  $k$  representa lo bien que un material conduce el calor y la capacidad calorífica,  $\rho C_p$ , representa cuánta energía almacena un material por unidad de volumen. Por lo tanto, la difusividad térmica de un material se puede concebir como la razón entre el *calor conducido* a través del material y el *calor almacenado* por unidad de volumen. Entre mayor sea la difusividad térmica, más rápida es la propagación del calor hacia el medio. Un valor pequeño de la difusividad térmica significa que, en su mayor parte, el calor es absorbido por el material y una pequeña cantidad de ese calor será conducido. Esta propiedad será determinada con la relación mostrada en Ec.65.

### **2.2.9 Emisividad**

La emisividad de una superficie representa la razón entre la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. La Universidad del Norte cuenta con un procesador térmico Fluke Ti32 con el cual se puede medir dicha propiedad de las siguientes formas.



Figura 34 Cámara termográfica

Los métodos que serán mencionados son ampliamente difundidos en la literatura y compañías fabricantes lo mencionan generalmente en sus catálogos.

#### **2.2.9.1 Método 1- Medición comparativa con un termómetro de contacto.**

Para este método se mide la temperatura de superficie del material con un sensor de temperatura de contacto previamente calibrado, posteriormente se mide la temperatura en la misma zona con una cámara de termografía con el valor de emisividad ajustado en 1. Luego se debe gradualmente disminuir el valor de la emisividad hasta que la temperatura detectada por la cámara corresponda a la del termómetro de contacto.

#### **2.2.9.2 Método 2- Medición comparativa con la cámara misma.**

Para este método se adhiere un pedazo de cinta adhesiva de emisividad conocida al objeto a medir (0.95-1). Debido a que conocemos la emisividad de la cinta adhesiva, una vez el objeto y la cinta hayan llegado a equilibrio térmico podemos medir la temperatura del objeto apuntando a la cinta, este valor sirve como temperatura de referencia. Posteriormente debemos ajustar la emisividad hasta que la cámara muestre la misma temperatura en una zona sin cinta que en una zona con la cinta adhesiva.

##### 2.2.9.2.1 Prueba piloto

###### 2.2.9.2.1.1 Método 1

En este método se utiliza un Fluke 179 el cual cuenta con un termopar tipo K con una precisión de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  y una cámara térmica con una precisión de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . La máxima diferencia posible para una misma medición de temperatura con este tipo

de instrumentos es de  $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en el rango manejado una diferencia de temperatura de esta magnitud produce una variación amplia en el valor de emisividad térmica. Por el tipo de instrumentación usada este método es descartado para la medición de la emisividad.

#### 2.2.9.2.1.2 Método 2

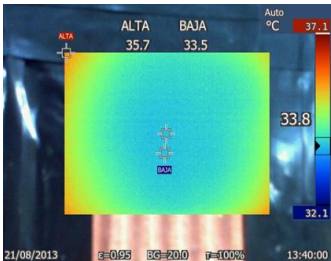
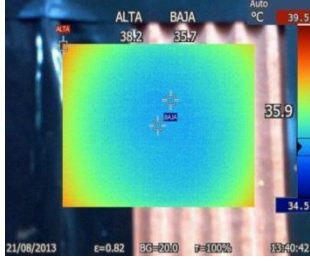
Fue colocado sobre el material de interés un fragmento de cinta adhesiva de la siguiente forma:



Figura 35 Configuración para medición de emisividad aplicando el método 2

Esta configuración fue elegida para que la cámara termografía únicamente tenga la posibilidad de percibir la influencia de la cinta y de la porción interna del material y no de factores externos. A continuación se presentan los resultados obtenidos usando este procedimiento:

Tabla 4 Resultados de prueba piloto para medición de emisividad aplicando el método 2

Material	Emisividad ajustada 0.95	Emisividad del material	Emisividad
1 Ladrillo #5 40X20X15 cm			0,82
Temperatura referencia (°C)	35.7	38.2	

<b>Material</b>	<b>Emisividad ajustada 0.95</b>	<b>Emisividad del material</b>	<b>Emisividad</b>
<b>Temperatura material (°C)</b>	33.5	<b>35.7</b>	

El valor de emisividad obtenido es acorde a los esperados, basados en la literatura los materiales constructivos poseen una emisividad entre 0.7 y 0.9

Por lo anterior el método seleccionado para la medición de emisividad es el método 2.

### 3 CARACTERIZACIONES METROLÓGICAS DE METODOS SELECCIONADOS

Este apartado de la investigación se divide en cuatro secciones: Propagación del error, análisis de capacidad de mediciones, atributos metrológicos y validación de mediciones.

En la primera sección *Propagación del error* se muestra que las mediciones realizadas para cada una de las propiedades no son un valor puntual sino que se manejan dentro de un rango (error) debido a la precisión de los instrumentos utilizados. En esta sección se muestra el modo de cálculo del error asociado a cada método de medición utilizado.

En la segunda sección *Análisis de capacidad de mediciones*, se determina el rango de medición de cada propiedad para los métodos seleccionados.

En la tercera sección *Atributos metrológicos*, se define la precisión de cada método de medición.

En la cuarta sección *Validación de mediciones*, son evaluadas la totalidad de propiedades para un material de amplio conocimiento, para validar cada medición realizada para los materiales constructivos seleccionados.

A continuación se presentan cada una de las secciones enunciadas.

### 3.1 PROPAGACIÓN DEL ERROR

Para la obtención de las propiedades de interés en esta investigación se miden diferentes variables indirectas que se encuentran relacionadas por una expresión matemática. La medida de las variables (temperatura, masa, longitud, voltaje y corriente) tienen una error asociada y los valores de las propiedades que se obtengan a partir de ellas también poseen un error. Para tener en cuenta la contribución que tiene cada variable en la medida derivada se usa el método de la suma de los errores; el cual enuncia, sea  $R$  una función dependiente de  $n$  variables primarias ( $r_i$ ), el error absoluto de la variable derivada  $\delta R$  es dependiente del error de las variables primarias y se expresa de la siguiente forma:

$$R = f(r_1, r_2, \dots, r_n) \quad (\text{Ec. 66})$$

$$\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial r_1} \right| \Delta r_1 + \left| \frac{\partial R}{\partial r_2} \right| \Delta r_2 + \dots + \left| \frac{\partial R}{\partial r_n} \right| \Delta r_n \quad (\text{Ec. 67})$$

Donde  $\Delta R$  es el error absoluto de la variable derivada y  $\Delta r_1, \dots, \Delta r_n$  son los errores asociados a las variables directas. Se describen a continuación las variables derivadas usadas en este trabajo

#### 3.1.1 Densidad aparente

La fórmula usada para el cálculo de esta propiedad es la siguiente:

$$\rho = \frac{m_{mat} + m_{aire}}{V_{mat} + V_{aire}} \quad (\text{Ec. 68})$$

La masa del material y del aire se miden en conjunto al igual sucede con el volumen de la muestra, teniendo lo siguiente:

$$\rho = \frac{m_{total}}{V_{total}} \quad (\text{Ec. 69})$$

Aplicando el análisis de propagación de error mostrado tenemos:

$$\Delta \rho = \frac{1}{V_{total}} \Delta m_{total} + \frac{m_{total}}{V_{total}^2} \Delta V_{total} \quad (\text{Ec. 70})$$

#### 3.1.2 Densidad por área

La fórmula para esta medida es la siguiente:

$$\rho_{Ar} = \frac{m_{total}}{A_{lateral}} \quad (\text{Ec. 71})$$

Aplicando el análisis descrito tenemos:



$$\Delta\rho = \frac{1}{A_{lateral}} \Delta m_{total} + \frac{m_{total}}{A_{lateral}^2} \Delta A_{lateral} \quad (\text{Ec. 72})$$

Como se observa el área es una medida derivada que tiene un error asociada por estar compuesta por dos medidas:

$$A_{lateral} = L_1 L_2 \quad (\text{Ec. 73})$$

El error asociado asociada es el siguiente:

$$\Delta A_{lateral} = L_2 \Delta L_1 + L_1 \Delta L_2 \quad (\text{Ec. 74})$$

### 3.1.3 Masa

La masa es una medida directa que tiene un error asociada al instrumento de medición:

$$\Delta masa = 0.1 g$$

### 3.1.4 Masa de agua

Es una medida directa con error asociada al instrumento de medición:

$$\Delta masa = 0.1 g$$

### 3.1.5 Conductividad térmica

La fórmula usada para el cálculo de esta propiedad es la siguiente:

$$k = \frac{\dot{Q}L}{A dT} \quad (\text{Ec. 75})$$

Como es evidente la variable medida es una variable derivada de 4 variables:

$$k = f(\dot{Q}, L, A, dT) \quad (\text{Ec. 76})$$

Aplicando el análisis descrito tenemos:

$$\Delta k = \frac{L}{A dT} \Delta \dot{Q} + \frac{\dot{Q}}{A dT} \Delta L + \frac{\dot{Q}L}{A^2 dT} \Delta A + \frac{\dot{Q}L}{A (dT)^2} \Delta (dT) \quad (\text{Ec. 77})$$

A su vez algunas de estas variables son derivadas de otras mediciones primarias:

$$\dot{Q} = f(V, I) \quad (\text{Ec. 78})$$

$$A = f(L_1, L_2) \quad (\text{Ec. 79})$$

$$dT = (T_{inf}, T_{sup}) \quad (\text{Ec. 80})$$

$$T_{inf} = f(T_1, T_2, T_3, T_4) \quad (\text{Ec. 81})$$

$$T_{sup} = f(T_5, T_6, T_7, T_8) \quad (\text{Ec. 82})$$

A continuación se determinan los errores asociadas a la medición de cada variable directa:

Área

$$A = L_1 L_2 \quad (\text{Ec. 83})$$

$$\Delta A = \left| \frac{\partial A}{\partial L_1} \right| \Delta L_1 + \left| \frac{\partial A}{\partial L_2} \right| \Delta L_2 \quad (\text{Ec. 84})$$

$$\Delta A = L_2 \Delta L_1 + L_1 \Delta L_2 \quad (\text{Ec. 85})$$

Siendo  $\Delta L_1 = \Delta L_2 = \Delta L$  por realizarse con el mismo instrumento de medición:

$$\Delta A = \Delta L (L_2 + L_1) \quad (\text{Ec. 86})$$

*Diferencia de temperatura*

La diferencia de temperatura entre la parte inferior y superior de la muestra está determinada por:

$$dT = T_{inf} - T_{sup} \quad (\text{Ec. 87})$$

La temperatura inferior es un promedio de 4 mediciones de temperatura realizadas con sensores similares

$$T_{inf} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4} \quad (\text{Ec. 88})$$

$$\Delta T_{inf} = \frac{\partial T_{inf}}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial T_{inf}}{\partial T_2} \Delta T_2 + \frac{\partial T_{inf}}{\partial T_3} \Delta T_3 + \frac{\partial T_{inf}}{\partial T_4} \Delta T_4 \quad (\text{Ec. 89})$$

$$\Delta T_{inf} = [\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4] \frac{1}{4} \quad (\text{Ec. 90})$$

Como la medición se realiza con sensores de temperaturas similares  $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T_3 = \Delta T_4 = \Delta T$

$$\Delta T_{inf} = \Delta T \quad (\text{Ec. 91})$$

La temperatura superior se comporta igual que la anterior:

$$T_{sup} = \frac{T_5 + T_6 + T_7 + T_8}{4} \quad (\text{Ec. 92})$$

$$\Delta T_{sup} = \Delta T \quad (\text{Ec. 93})$$

Reemplazando en la diferencia de temperatura lo obtenido:

$$dT = T_{inf} - T_{sup} \quad (\text{Ec. 94})$$

$$\Delta(dT) = \frac{\partial (dT)}{\partial T_{inf}} \Delta T_{inf} + \frac{\partial (dT)}{\partial T_{sup}} \Delta T_{sup} \quad (\text{Ec. 95})$$

$$\Delta(dT) = \Delta T_{inf} + \Delta T_{sup} = \Delta T + \Delta T = 2\Delta T \quad (\text{Ec. 96})$$

$$\Delta(dT) = 2\Delta T \quad (\text{Ec. 97})$$

## Potencia

La potencia disipada por la resistencia es:

$$\dot{Q} = IV \left( \frac{t}{T} \right) = IV\bar{T} \quad (\text{Ec. 98})$$

$$\Delta\dot{Q} = \frac{\partial \dot{Q}}{\partial I} \Delta I + \frac{\partial \dot{Q}}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial \dot{Q}}{\partial \bar{T}} \Delta \bar{T} = V\bar{T} \Delta I + I\bar{T} \Delta V + VI \Delta \bar{T} \quad (\text{Ec. 99})$$

$$\Delta\dot{Q} = V\bar{T} \Delta I + I\bar{T} \Delta V + VI \Delta \bar{T} \quad (\text{Ec. 100})$$

Reemplazando en la ecuación de conductividad tenemos:

$$\Delta k = \frac{L}{A} \frac{\Delta Q}{dT} + \frac{\dot{Q}}{A} \frac{\Delta L}{dT} + \frac{\dot{Q}L}{A^2} \frac{\Delta A}{dT} + \frac{\dot{Q}L}{A} \frac{\Delta(dT)}{(dT)^2} \quad (\text{Ec. 101})$$

$$\Delta k = \frac{L}{A} \frac{1}{dT} [V\bar{T} \Delta I + I\bar{T} \Delta V + VI \Delta \bar{T}] + \frac{\dot{Q}}{A} \frac{\Delta L}{dT} + \frac{\dot{Q}L}{A^2} \frac{\Delta L(L_2 + L_1)}{dT} + \frac{\dot{Q}L}{A} \frac{2\Delta T}{(dT)^2} \quad (\text{Ec. 102})$$

### 3.1.6 Calor específico

La fórmula usada para el cálculo de esta propiedad es la siguiente:

$$C_{elemento} = \frac{[mC(T_f - T_i)]_{agua} + [mC(T_f - T_i)]_{aire}}{[m(T_i - T_f)]_{elemento}} \quad (\text{Ec. 103})$$

Como es evidente la variable medida es una variable derivada de 4 variables:

$$C_{elemento} = f(m_{agua}, dT_{agua}, V_{aire}, dT_{aire}, m_{elemento}, dT_{elemento}) \quad (\text{Ec. 104})$$

Aplicando el análisis de incertidumbre tenemos:

$$\Delta C_{elemento} = \frac{[C(T_f - T_i)]_{agua}}{[m(T_i - T_f)]_{elemento}} \Delta m_{agua} + \frac{[mC]_{agua}}{[m(T_i - T_f)]_{elemento}} \Delta(dT)_{agua} + \frac{[C(T_f - T_i)]_{aire}}{[m(T_i - T_f)]_{elemento}} \Delta m_{aire} +$$

$$\frac{[mC]_{aire}}{[m(T_i-T_f)]_{elemento}} \Delta(dT)_{aire} + \frac{[mC(T_f-T_i)]_{agua} + [mC(T_f-T_i)]_{aire}}{[m^2(T_i-T_f)]_{elemento}} \Delta m_{elemento} + \frac{[mC(T_f-T_i)]_{agua} + [mC(T_f-T_i)]_{aire}}{[m(T_i-T_f)^2]_{elemento}} \Delta(dT)_{elemento} \quad (\text{Ec. 105})$$

$$\Delta C_{elemento} = \frac{[C(T_f-T_i)\Delta m]_{agua} + [mC\Delta(dT)]_{agua}}{[m(T_i-T_f)]_{elemento}} + \frac{[C(T_f-T_i)\Delta m]_{aire} + [mC\Delta(dT)]_{aire}}{[m(T_i-T_f)]_{elemento}} + \frac{[mC(T_f-T_i)]_{agua} + [mC(T_f-T_i)]_{aire}}{[m^2(T_i-T_f)]_{elemento}} \Delta m_{elemento} + \frac{[mC(T_f-T_i)]_{agua} + [mC(T_f-T_i)]_{aire}}{[m(T_i-T_f)^2]_{elemento}} \Delta(dT)_{elemento} \quad (\text{Ec. 106})$$

### 3.1.7 Difusividad térmica

Esta es una propiedad derivada, es calculada de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{Ec. 107})$$

Aplicando el análisis de incertidumbre tenemos:

$$\Delta\alpha = \frac{1}{\rho C_p} \Delta k + \frac{k}{\rho^2 C_p} \Delta\rho + \frac{k}{\rho C_p^2} \Delta C_p \quad (\text{Ec. 108})$$

## 3.2 ANALISIS DE CAPACIDAD DE MEDICIONES

### 3.2.1 Conductividad térmica

Para determinar el rango de medición del método escogido en esta propiedad, se realizan dos tipos de análisis, cada uno con criterios distintos y limitados por las características físicas del equipo construido y de los materiales constructivos del mercado.

#### *Límite superior*

El método seleccionado especifica que se debe conocer la temperatura en la parte inferior del material constructivo, para esto se colocaron sensores de temperatura en la parte superior de la placa y encima de estos el material, quedando un espacio entre el material y la placa igual al espesor del sensor de temperatura (1mm).

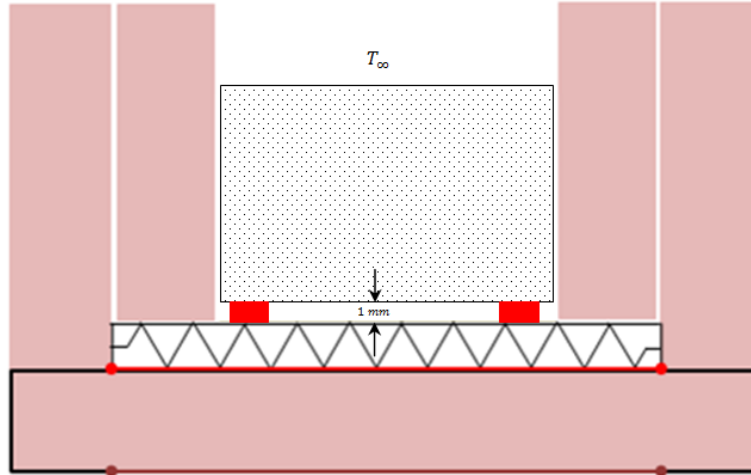


Figura 36 Espacio de aire entre placa y material del equipo de medición de conductividad térmica

Este pequeño espacio de aire ofrece una resistencia que debe ser considerada en los cálculos realizados. El circuito de resistencias que se presenta en el caso estudiado es el siguiente:

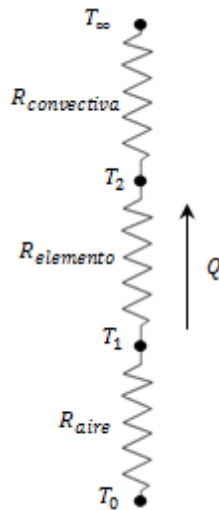


Figura 37 Circuito de resistencia térmica del equipo de medición de conductividad térmica

En el anterior esquema  $T_0$  es la temperatura de la placa ( $70^\circ\text{C}$ ),  $T_1$  es la temperatura en la parte inferior del material,  $T_2$  es la temperatura en la parte superior del material y  $T_\infty$  es la temperatura ambiente. En este circuito térmico se ven involucrados el espacio de aire, el material constructivo y el medio en el cual

se encuentra realizando la prueba. El aporte en la resistencia total que tiene cada uno de los mencionados es el siguiente:

*Resistencia del aire*

$$R_{aire} = \left(\frac{L}{k}\right)_{aire} \quad \text{(Ec. 109)}$$

*Resistencia del material constructivo*

$$R_{el} = \left(\frac{L}{k}\right)_{el} \quad \text{(Ec. 110)}$$

*Resistencia convectiva*

$$R_{conv} = \frac{1}{h} \quad \text{(Ec. 111)}$$

Donde h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

La resistencia total del sistema está determinada por la suma de las resistencias en serie:

*Resistencia total*

$$R_t = R_{aire} + R_{el} + R_{conv} \quad \text{(Ec. 112)}$$

El porcentaje de la resistencia del material constructivo en la resistencia total se determina a partir de la siguiente relación:

*Porcentaje de  $R_{el}$*

$$\%R = \frac{R_{el}}{R_{total}} \quad \text{(Ec. 113)}$$

La cantidad de calor teórico que debe suministrar la resistencia para alcanzar la condición de equilibrio buscada es el siguiente:

*Calor*

$$Q = \frac{(70 - T_{\infty})}{R_t} A \quad \text{(Ec. 114)}$$

Teniendo en cuenta lo anterior y asumiendo que el espacio de aire entre la placa y el material se encuentra casi estático, la temperatura  $T_1$  en la superficie del material está dada por:

$$T_1 = 70 - \frac{Q}{A} \left(\frac{L}{k}\right)_{aire} \quad \text{(Ec. 115)}$$

La temperatura  $T_2$ , en la superficie superior del material está dado por:

$$T_2 = T_1 - \frac{Q}{A} \left( \frac{L}{k} \right)_{el} \quad (\text{Ec. 116})$$

La conductividad del material evaluado está dada por la siguiente expresión:

$$k_{el} = \frac{QL_{el}}{A\Delta T} \quad (\text{Ec. 117})$$

Donde  $\Delta T$  teórico sería:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{Q}{A} \left( \frac{L}{k} \right)_{el} \quad (\text{Ec. 118})$$

Como son utilizados instrumentos que poseen una precisión asociada, cada medición oscila en un rango, lo cual se observa en el apartado de propagación del error. El tipo de sensor de menor precisión que el equipo posee es el de temperatura, los cuales tienen una precisión de  $\pm 1^\circ\text{C}$  por ende  $\Delta T$  puede variar en  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Si consideramos esta variación en la medición de temperatura, el valor de la conductividad del material oscila en un rango el cual está dado por la siguiente expresión:

$$k_{el}^{\pm} = \frac{QL_{el}}{A \left[ \frac{Q}{A} \left( \frac{L}{k} \right)_{el} \pm 2 \right]} = \frac{\frac{(70-T_{\infty})}{R_t} A L_{el}}{A \left[ \frac{\frac{(70-T_{\infty})}{R_t} A L_{el}}{A} \left( \frac{L}{k} \right)_{el} \pm 2 \right]} = \frac{\frac{(70-T_{\infty})}{R_t} L_{el}}{\frac{(70-T_{\infty})}{R_t} R_{el} \pm 2} \quad (\text{Ec. 119})$$

Simplificado la expresión:

$$D = \frac{(70-T_{\infty})}{R_t} \quad (\text{Ec. 120})$$

Reemplazando  $D$ ,

$$k_{el}^{\pm} = \frac{D L_{el}}{D \left( \frac{L}{k} \right)_{el} \pm 2} \quad (\text{Ec. 121})$$

El porcentaje de variación de la conductividad encontrada con respecto a la real está dada por:

$$\% \Delta k = \frac{k_{el} - k_{el}^{\pm}}{k_{el}} \quad (\text{Ec. 122})$$

Reemplazando en la anterior expresión lo conocido:

$$\% \Delta k = \frac{\frac{L_{el}}{R_{el}} \frac{D}{DR_{el} \pm 2} L_{el}}{\frac{L_{el}}{R_{el}}} = \frac{1}{R_{el}} \frac{D}{DR_{el} \pm 2} = 1 - \frac{R_{el} D}{DR_{el} \pm 2} \quad (\text{Ec. 123})$$

Reemplazando  $D$

$$\% \Delta k = 1 - \frac{R_{el} \frac{(70-T_{\infty})}{R_t}}{\frac{(70-T_{\infty}) R_{el} \pm 2}{R_t}} = 1 - \frac{\%R (70-T_{\infty})}{\%R (70-T_{\infty}) \pm 2} = 1 - \frac{\%R}{\%R \pm \frac{2}{(70-T_{\infty})}} \quad (\text{Ec. 124})$$

Simplificando la expresión:

$$P = \frac{2}{(70-T_{\infty})} \quad (\text{Ec. 125})$$

Reemplazando  $P$

$$\% \Delta k = 1 - \frac{\%R}{\%R \pm P} \quad (\text{Ec. 126})$$

La anterior expresión relaciona, el porcentaje de variación de la conductividad medida por efecto de una variación en la temperatura, con el porcentaje de la resistencia del material constructivo en la resistencia total. Si la máxima variación permisible aceptable para una medición es del 10%, tenemos lo siguiente:

$$\% \Delta k \leq 0.1$$

$$0.1 \geq 1 - \frac{\%R}{\%R \pm P} \quad (\text{Ec. 127})$$

Trabajando algebricamente:

$$\frac{\%R}{\%R \pm P} \geq 0.9 \quad (\text{Ec. 128})$$

$$\%R \geq 0.9\%R \pm 0.9P \quad (\text{Ec. 129})$$

$$\%R \geq \pm \frac{0.9}{0.1} P \quad (\text{Ec. 130})$$

$$\%R \geq \pm 9P \quad (\text{Ec. 131})$$

Reemplazando el valor de  $P$

$$\%R \geq \pm 9 \frac{2}{(70-T_{\infty})} \quad (\text{Ec. 132})$$

Las pruebas realizadas con este equipo se realizan a una temperatura ambiente de 22°C teniendo:

$$\%R \geq \pm 0.375 \quad (\text{Ec. 133})$$



Lo cual significa que siempre que la resistencia del material constructivo sea mayor al 37.5% de la resistencia total se cumplirá la condición de variaciones de menos del 10% en la propiedad medida por efecto de la precisión de los sensores de temperatura. Reemplazando %R

$$\frac{R_{el}}{R_{total}} \geq \pm 0.375 \quad (\text{Ec. 134})$$

Reemplazando  $R_{total}$  y trabajando algebraicamente:

$$R_{el} \geq \pm 0.375(R_{aire} + R_{el} + R_{conv}) \quad (\text{Ec. 135})$$

$$R_{el} \geq 0.375R_{el} + 0.375(R_{aire} + R_{conv}) \quad (\text{Ec. 136})$$

$$0.625R_{el} \geq 0.375(R_{aire} + R_{conv}) \quad (\text{Ec. 137})$$

$$R_{el} \geq 0.6(R_{aire} + R_{conv}) \quad (\text{Ec. 138})$$

Reemplazando valores teóricos conocidos como la conductividad del aire y asumiendo un coeficiente convectivo típico tenemos:

$$R_{el} \geq 0.6 \left( \frac{0.001 \text{ m}}{0.024 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{1}{25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} \right) \quad (\text{Ec. 139})$$

$$R_{el} \geq 0.049 \quad (\text{Ec. 140})$$

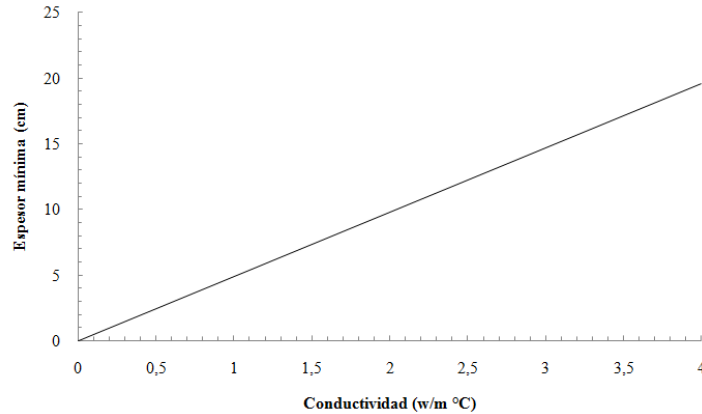
Reemplazando la resistencia del material constructivo:

$$\left( \frac{L}{k} \right)_{el} \geq 0.049 \quad (\text{Ec. 141})$$

Despejando en la desigualdad el espesor del material:

$$L_{el} \geq 0.049 k_{el} \quad (\text{Ec. 142})$$

Esto significa que para cada conductividad térmica medida existe un valor mínimo de espesor que debe tener cada material para cumplir con la condición dada. Lo cual es graficado a continuación:



**Figura 38 Espesor mínimo del material constructivo en función de la conductividad térmica para medición adecuada del equipo de conductividad térmica**

Sabiendo que el espesor máximo que puedo ser colocado en el equipo es de 20 cm por su geometría, la conductividad máxima que puede ser medida es:

$$k_{el_{max}} = 4$$

Es importante destacar que el rango de conductividades de materiales constructivos que se evalúan se encuentran entre (0,1), para lo cual se necesitan espesores de mínimos de menos de 5 cm, con lo cual cumple la totalidad de materiales.

#### *Límite inferior*

El equipo utilizado posee una resistencia térmica que calienta la superficie interna del material hasta una temperatura especificada. Como la resistencia además de estar en contacto con el material constructivo se encuentra soportada sobre una estructura interna del equipo, conformada básicamente de aislante térmico de fibra de vidrio, parte del calor disipado es conducido por la parte inferior del equipo.

Por lo anterior el calor total disipado por la resistencia térmica se distribuye de la siguiente forma:

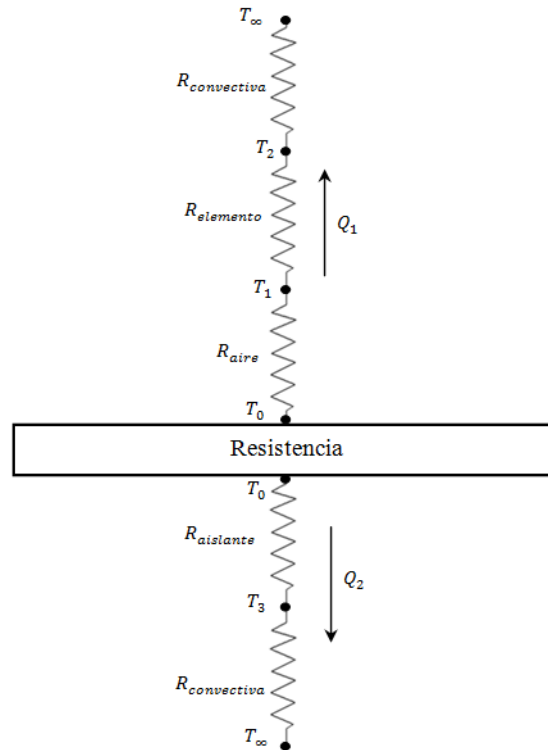


Figura 39 Circuito de resistencia térmica del equipo de medición de conductividad térmica

El calor total disipado es igual al calor conducido a través del material en estudio más el calor conducido por el aislamiento que se encuentra en la parte inferior:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 \quad (\text{Ec. 143})$$

El calor conducido por el material constructivo es el siguiente:

$$Q_1 = \frac{(70 - T_\infty)}{R_{\text{aire}} + R_{\text{el}} + R_{\text{conv}}} A \quad (\text{Ec. 144})$$

El calor conducido por el aislamiento térmico está dado por:

$$Q_2 = \frac{(70 - T_\infty)}{R_{\text{ais}} + R_{\text{conv}}} A \quad (\text{Ec. 145})$$

El porcentaje de calor disipado por el aislamiento térmico se calcula como:

$$\%Q_2 = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (\text{Ec. 146})$$

En el cálculo de la conductividad térmica del material constructivo el calor disipado es directamente proporcional; una variación del calor representa una variación en la conductividad de igual proporción. Se ha definido que la variación máxima

aceptable para la medición es de 5%, es decir para cada medición se acepta una pérdida de calor del equipo del 5%.

$$\%Q_2 \leq P \quad (\text{Ec. 147})$$

Reemplazando lo obtenido:

$$\frac{\frac{(70-T_{\infty})A}{R_{ais}+R_{conv}}}{\frac{(70-T_{\infty})A}{R_{aire}+R_{el}+R_{conv}} + \frac{(70-T_{\infty})A}{R_{ais}+R_{conv}}} \leq P \quad (\text{Ec. 148})$$

Trabajando algebraicamente

$$\frac{\frac{1}{R_{ais}+R_{conv}}}{\frac{1}{R_{aire}+R_{el}+R_{conv}} + \frac{1}{R_{ais}+R_{conv}}} \leq P \quad (\text{Ec. 149})$$

$$\frac{1}{R_{aire}+R_{el}+R_{conv}} + 1 \leq P \quad (\text{Ec. 150})$$

$$\frac{1}{P} \leq \frac{R_{ais}+R_{conv}}{R_{aire}+R_{el}+R_{conv}} + 1 \quad (\text{Ec. 151})$$

$$\frac{1}{P} - 1 \leq \frac{R_{ais}+R_{conv}}{R_{aire}+R_{el}+R_{conv}} \quad (\text{Ec. 152})$$

$$R_{el} \leq \frac{R_{ais}+R_{conv}}{\frac{1}{P}-1} - (R_{aire} + R_{conv}) \quad (\text{Ec. 153})$$

Reemplazando los valores conocidos:

$$L_{ais} = 0.12m$$

$$h = 25 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$k_{ais} = 0.037 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$$

Se obtiene

$$R_{el} \leq \frac{3.2832}{\frac{1}{P}-1} - (0.0816) \quad (\text{Ec. 154})$$

$$R_{el} \leq 0.091 \quad (\text{Ec. 155})$$

Se reemplaza  $R_{el}$

$$\frac{L_{el}}{k_{el}} \leq 0.091 \quad (\text{Ec. 156})$$

Se despeja  $k_{el}$

$$\frac{L_{el}}{0.091} \leq k_{el} \quad (\text{Ec. 157})$$

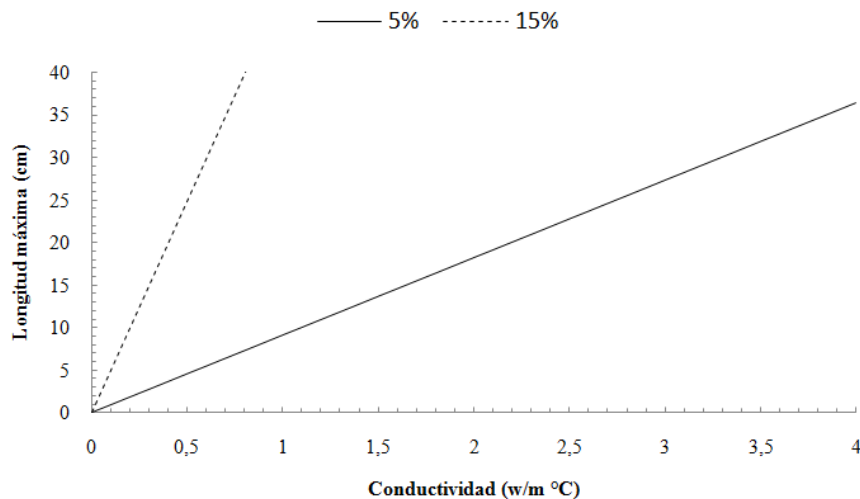
El valor mínimo de conductividad térmica se obtiene con el espesor mínimo de un material constructivo. En el mercado el espesor mínimo de un material es de 1 cm, obteniendo:

$$k_{el} \geq 0.109 \quad (\text{Ec. 158})$$

Para pérdidas menores del 5% de calor la conductividad mínima es de  $0.109 \frac{w}{m^{\circ}C}$ .

Para valores menores de conductividad las pérdidas asociadas serán mayores a 5% y deberán ser corregidas.

Por las características geométricas de los materiales constructivos y los valores de conductividad esperados basados en el estado del arte, las mediciones de este tipo de material no cumplirían con la especificación de máximo 5% de pérdidas de calor, esto debido a que los valores máximos de espesor para conductividades entre (0,1) son menores a los 6 cm, donde usualmente en materiales constructivos se manejan espesores de 9 a 20 cm. Por lo anterior la pérdida de calor en estas mediciones superará el 5% hasta aproximadamente un 15% para cumplir con las especificaciones de la geometría del material. Lo anterior se muestra a continuación:



**Figura 40** Espesor máximo del material constructivo en función de la conductividad térmica para medición adecuada del equipo de conductividad térmica

Por lo anterior todas las mediciones realizadas deben ser corregidas por la pérdida de calor asociada.

### 3.2.2 Calor específico

Para la determinación del rango de medición del calor específico se tendrán en cuenta la capacidad máxima del calorímetro utilizado y la variación mínima de temperatura en el medio de enfriamiento (agua).

#### *Límite superior*

Los límites superior e inferior se darán en función de la capacidad calórica debido a que es una unidad que tiene en cuenta la densidad del material a medir. Del balance de energía entre el medio y el material constructivo se tiene:

$$mC_{elemento} = \frac{[mC(T_f - T_i)]_{agua} + [mC(T_f - T_i)]_{aire}}{[(T_i - T_f)]_{elemento}} \quad (\text{Ec. 159})$$

La máxima temperatura de equilibrio permisible será 90°C, esto para evitar que el agua se evapore y tener pérdidas en la masa. La temperatura inicial promedio del agua se asume 26°C.

$$mC_{elemento} = \frac{[mC(90 - 26)]_{agua} + [mC(90 - 26)]_{aire}}{[(200 - 90)]_{el}} \quad (\text{Ec. 160})$$

La capacidad calórica es máxima cuando la cantidad de agua es máxima y la cantidad máxima de agua es de 25 L.

$$mC_{elemento} \leq \frac{[25 \text{ kg} \times 4181 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times (90 - 26)^\circ\text{C}]_{agua}}{[(200 - 90)^\circ\text{C}]_{el}} = 60814 \frac{\text{J}}{^\circ\text{C}} \quad (\text{Ec. 161})$$

El límite superior de medición del método es de  $60814 \frac{\text{J}}{^\circ\text{C}}$

#### *Límite inferior*

Para definir este límite se tendrá en cuenta que la mínima variación de temperatura en el agua sea de 4°C, reemplazando:

$$mC_{elemento} \geq \frac{[2 \text{ kg} \times 4181 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times (4)]_{agua} + [mC(4)]_{aire}}{[(200 - 30)]_{el}} = 196 \frac{\text{J}}{^\circ\text{C}} \quad (\text{Ec. 162})$$

El límite inferior de medición del método es de  $196 \frac{J}{^\circ C}$

En el caso de los aislantes térmico estos no podrán ser calentados a una temperatura superior a  $80^\circ C$  debido a que pierden sus propiedades. De igual forma la variación mínima de temperatura que se espera es de  $4^\circ C$ . Despreciando el efecto del aire tenemos:

$$mC_{elemento} = \frac{[mC(4)]_{agua}}{[(80-30)]_{elemento}} \quad (\text{Ec. 163})$$

Se expresan las masas en función del volumen y la densidad:

$$\rho_{el} A h C_{elemento} = \frac{[4181 \rho A y(2)]_{agua}}{[(25)]_{elemento}} \quad (\text{Ec. 164})$$

Se despeja la altura de agua  $y$ :

$$\frac{25 \rho_{el} C_{elemento}}{[8362 \rho]_{agua}} h = [y]_{agua} \quad (\text{Ec. 165})$$

Para la maximizar la cantidad de agua el calor específico del aislante debe ser máximo y la densidad máxima. Para los aislantes térmicos en la literatura los calores específico varían entre  $600 - 1200 \frac{J}{kg \ ^\circ C}$  y la densidad entre  $10$  y  $200 \frac{kg}{m^3}$ .

Reemplazando el mayor valor tenemos:

$$[y]_{agua} = 0.7 h \quad (\text{Ec. 166})$$

Lo cual quiere decir que en la mejor condición la altura de agua debe ser  $0.7$  veces el espesor del aislante medido, por esto en todas las situaciones parte del aislante debe quedar sin sumergirse, lo cual por el tipo de instrumentación con que se cuenta no es recomendable, debido a que no se puede cuantificar la cantidad de calor que se disipa por acción de la convección natural. Por lo anterior los materiales aislantes son descartados para la medición de calor específico con este método.

### 3.2.3 Difusividad térmica

Debido a que la difusividad se encuentra por la relación entre la conductividad térmica, el calor específico y la densidad, el rango está determinado por estas propiedades:

$$\alpha_{max} = \frac{k_{max}}{\rho C_p min} = \frac{V_{max} k_{max}}{m C_p min} = \frac{(0.012 m^3) \left(4 \frac{W}{m^2 C}\right)}{196 \frac{J}{C}} = 2.44 \times 10^{-4} \frac{m^2}{s} \quad (\text{Ec. 167})$$

$$\alpha_{min} = \frac{k_{min}}{\rho C_p max} = \frac{V_{min} k_{min}}{m C_p min} = \frac{(5.44 \times 10^{-4} m^3) \left(0.1 \frac{W}{m^2 C}\right)}{60814 \frac{J}{C}} = 8.44 \times 10^{-10} \frac{m^2}{s} \quad (\text{Ec. 168})$$

### 3.2.4 Emisividad

Por la metodología usada la el rango de esta prueba debe estar entre 0.01 a 0.95. Se espera que los resultados obtenidos para los materiales constructivos se encuentren entre 0.7 y 0.95; la metodología únicamente fue probada en este rango de medición.

### 3.3 ATRIBUTOS METROLÓGICOS

En todo proceso de medición se presentan limitaciones asociadas a los instrumentos usados; se define la repetibilidad como la variación en las mediciones obtenidas al utilizar el mismo equipo de medición para medir características idénticas de las mismas piezas, en función de la variabilidad que tiene el equipo de medida. Es importante determinar la repetibilidad del equipo de medición empleado para poder estimar los valores de las propiedades térmicas de los materiales de construcción a partir de los valores muestrales obtenidos.

Las estimaciones de valores poblacionales hechas a través de valores muestrales presentan dos tipos de error:

- *Errores ajenos al muestreo* dado por observaciones hechas de manera inadecuada inherente a toda investigación.
- *Errores de muestreo* debido a que solo se estudia una facción de la población total. Este tipo de error se puede estimar a partir de los resultados obtenidos y permite evaluar la calidad de la estimación mediante el cálculo del **coeficiente de variación**.

El coeficiente de variación es una calificación que permite a los usuarios evaluar la calidad estadística de las estimaciones. Para la muestra en estudio se considera que una estimación con un coeficiente de variación:

- Hasta del 7%, es precisa;
- Entre el 8 y el 14% significa que existe una precisión aceptable;



- Entre el 15% y 20% precisión regular y por lo tanto se debe utilizar con precaución.
- Mayor del 20% indica que la estimación es poco precisa y por lo tanto se recomienda utilizarla sólo con fines descriptivos (tendencias no niveles).

Para cada una de las propiedades térmicas determinadas, se determinará la precisión del instrumento calculando el coeficiente de variación en cada caso.

### 3.3.1 Conductividad térmica

Sobre una muestra de mortero de  $0.30 \times 0.20 \times 0.015$  m se tomaros seis muestras de conductividad térmica. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5 a continuación.

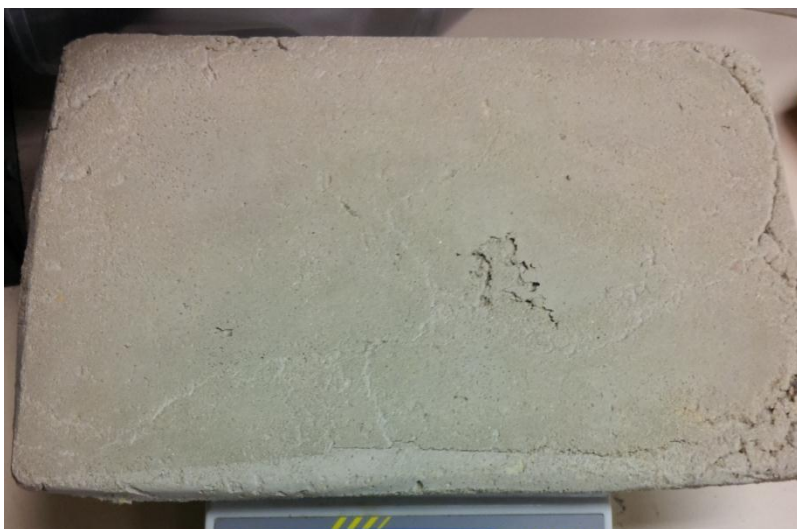


Figura 41 – Muestra de mortero para medición de precisión del equipo de conductividad térmica

Tabla 5 – Valores de conductividad térmica del mortero, para medición de precisión del equipo de conductividad térmica

n	Conductividad ( $W/m^{\circ}C$ )
1	0.223
2	0.240
3	0.225
4	0.230
5	0.210
6	0.228
7	0.206

El coeficiente de variación de Pearson en este caso está dado por:

$$C_v = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} = \frac{0.011725}{0.223114} \times 100 = 5.25\% \quad (\text{Ec. 169})$$

Por lo tanto se puede concluir que la estimación de la conductividad térmica, con el coeficiente de variación obtenido es *precisa*.

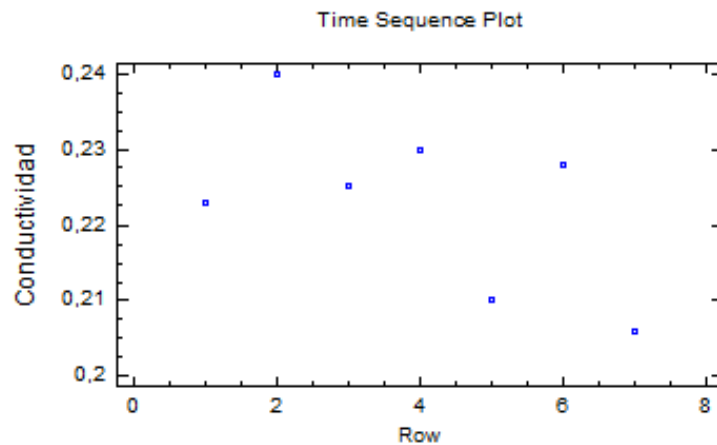


Figura 42 –Secuencia de tiempo para valores de conductividad térmica obtenidos

En la Figura 42 no se observa ningún patrón de comportamiento en los valores de conductividad térmica obtenidos.

### 3.3.2 Calor específico

Sobre una muestra de acero ASTM A36 de 3.429 kg se tomaros cuatro muestras de calor específico. Los resultados obtenidos se muestran en la *Tabla 6* a continuación.



Figura 43 Muestra de acero A36 para medición de la precisión del método de medición de calor específico

Tabla 6 Valores de calor específico obtenidos del A36

n	Calor específico $\left(\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}\right)$
1	433
2	443
3	434
4	454

El coeficiente de variación de Pearson en este caso está dado por:

$$C_v = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} = \frac{9.763879}{441} \times 100 = 2.21\% \quad (\text{Ec. 170})$$

Por lo tanto se puede concluir que la estimación de la conductividad térmica, con el coeficiente de variación obtenido es *precisa*.

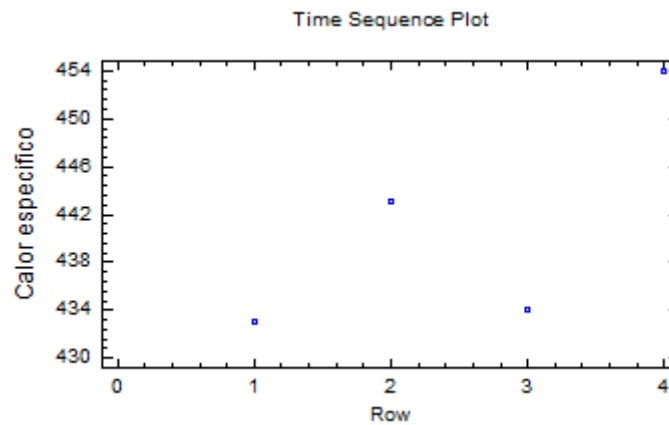


Figura 44 Secuencia de tiempo para valores de calor específico obtenidos

En la figura 44 no se observa ningún patrón de comportamiento en los valores de conductividad térmica obtenidos.

### 3.3.3 Emisividad

Sobre una muestra de acero oxidado se tomaron cuatro muestras de emisividad. Los resultados obtenidos se muestran en la *Tabla 7* a continuación.



Figura 45 Muestra de acero oxidado para medición de precisión de emisividad

Tabla 7 Valores de emisividad obtenidos

n	$\varepsilon$
1	0.78
2	0.82
3	0.78
4	0.81

El coeficiente de variación de Pearson en este caso está dado por:

$$C_v = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} = \frac{0.02061553}{0.7975} \times 100 = 2.58\% \quad (\text{Ec. 171})$$

Por lo tanto se puede concluir que la estimación de la conductividad térmica, con el coeficiente de variación obtenido es *precisa*.

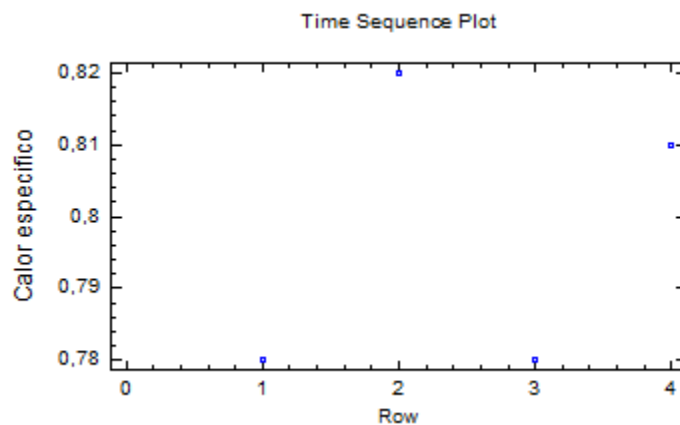


Figura 46 Secuencia de tiempo para la valores de emisividad obtenidos

En la gráfica anterior no se observa ningún patrón de comportamiento en los valores de conductividad térmica obtenidos.

### 3.4 VALIDACIÓN DE MEDICIONES

Cada instrumento de medición y metodología desarrollada debe ser ajustado a partir de la medición de un patrón de referencia que posea un valor conocido de la propiedad medida, para verificar la calidad de la medición realizada y en caso que lo necesite ajustar los valores obtenidos.

#### 3.4.1 Conductividad térmica

Las mediciones realizadas con el equipo de medición de conductividad térmica deben ser validadas con un material que tenga conductividad entre  $0.1 - 4.0 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$  y cumplir las condiciones de espesor mínimo y máximo, lo anterior descarta a los aceros los cuales son de fácil consecución y de amplio estudio así como el vidrio y los plásticos. Para la esta validación se usara fibra de vidrio; nos apoyaremos en un estudio realizado que relaciona la densidad de la fibra con la conductividad térmica [62] :

Tabla 8 Densidad y conductividad térmica a 0 °C del aislante de fibra de vidrio

Tipo	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )/(kcal h <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )
Tipo I	10-18	0,044/0,038
Tipo II	19-30	0,037/0,032
Tipo III	31-45	0,034/0,029
Tipo IV	46-65	0,033/0,028
Tipo V	66-90	0,033/0,028
Tipo V	91	0,036/0,031
Fibra de vidrio, ligada con resina	64-144	0,036/0,031

Se realizó una prueba sobre una muestra de fibra de vidrio de  $0.40 \times 0.20 \times 0.025 \text{ cm}$  obteniendo los siguientes resultados. La distribución de temperatura en la cara inferior y superior de la muestra se presenta:

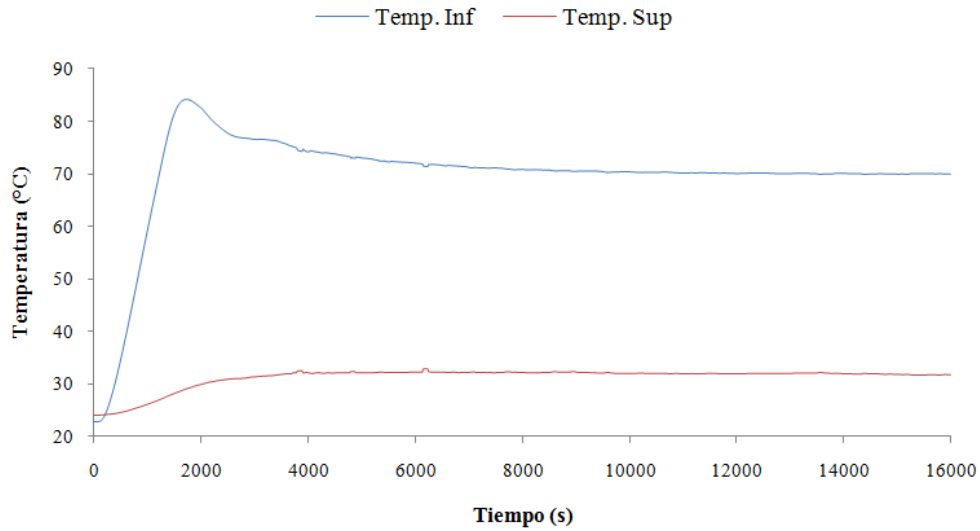


Figura 47 Temperatura inferior y superior del poliestireno en prueba de medición de conductividad térmica

El comportamiento de la potencia es el siguiente:

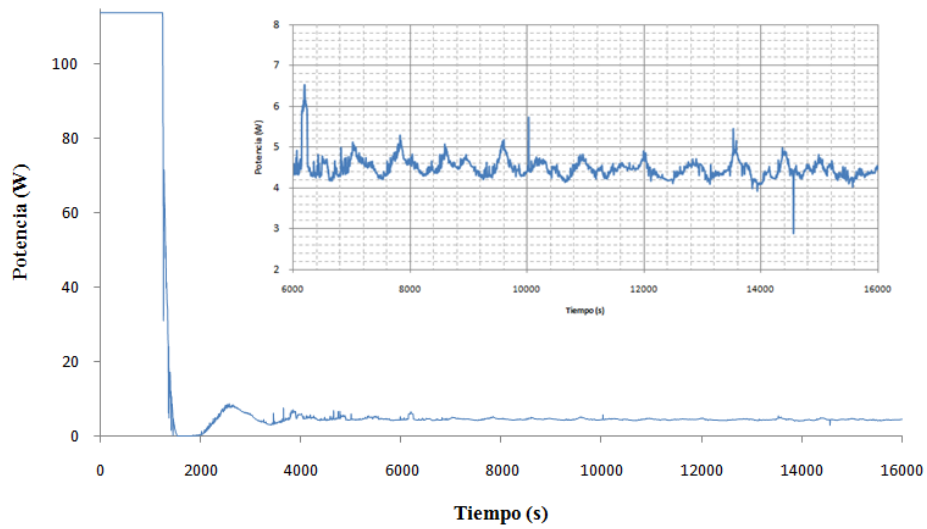
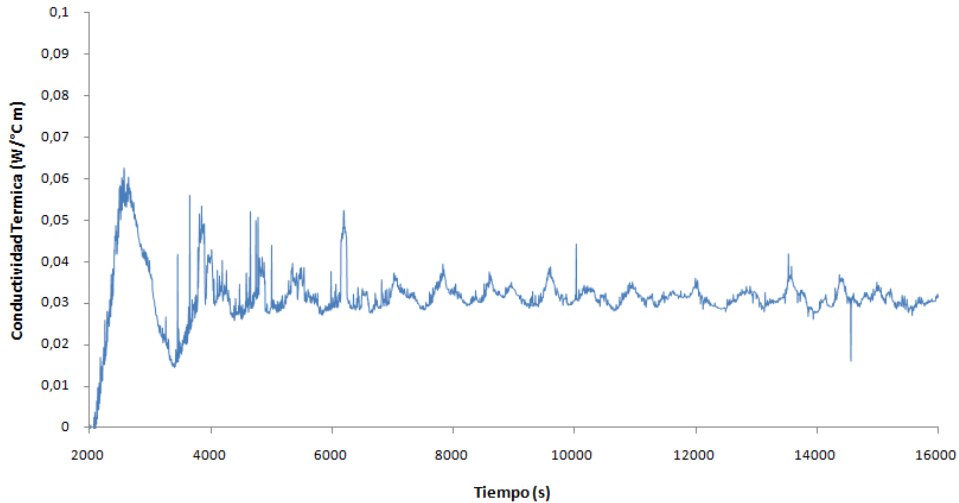


Figura 48 Comportamiento de la potencia suministrada a muestra de poliestireno en prueba de medición de conductividad térmica

El siguiente es el comportamiento de la conductividad térmica en la totalidad de la prueba, aquí se evidencia la tendencia del valor de la conductividad:



**Figura 49 Comportamiento de la conductividad térmica del poliestireno**

El valor medio de la conductividad térmica junto al error asociado a la medición es de:

$$k = 0.031 \frac{W}{m^{\circ}C} \pm 0.00366$$

$$R = 0.794 \frac{m^{2^{\circ}C}}{W}$$

La densidad de la fibra de vidrio para su clasificación según lo encontrado es:

$$d = \frac{m}{v} = \frac{0.179 \text{ kg} \pm 0.001 \text{ kg}}{(0.4 \times 0.2 \times 0.025) \text{ m}^3} = 89.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \pm 4.3 \quad (\text{Ec. 172})$$

Lo cual corresponde a una fibra tipo V de densidad entre  $66 - 90 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  y conductividad entre  $0.033 - 0.028 \frac{W}{m^{\circ}C}$ . Para la densidad de  $89.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  la conductividad es de  $0.0281 \frac{W}{m^{\circ}C}$ . Debido al margen de error que el equipo posee por la precisión de los instrumentos de medición el valor de conductividad oscila entre  $[0.0273 - 0.0346] \frac{W}{m^{\circ}C}$ ; como el valor de referencia se encuentra dentro de los límites de medición, se considera que las mediciones realizadas con el equipo se encuentran validadas.

### 3.4.2 Calor específico

Sobre una muestra de acero ASTM A36 de 3.429 kg se tomaron cuatro muestras de calor específico. Los resultados obtenidos se muestran en la *Tabla 6*. El rango de las mediciones realizadas se muestra en el siguiente gráfico:

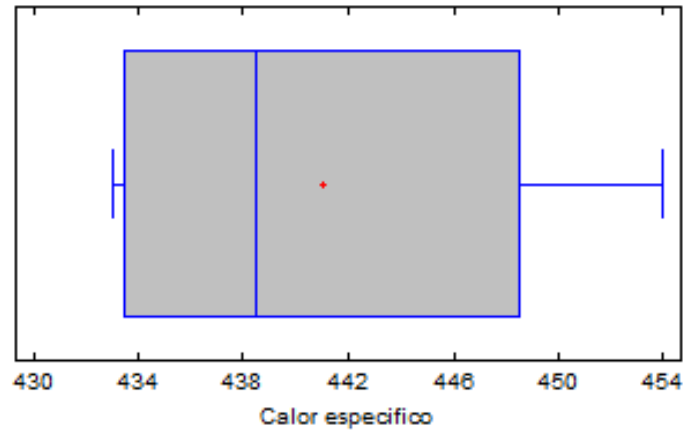


Figura 50 Diagrama de caja para los valores obtenidos en la medición de calor específico del ASTM A36

Las mediciones realizadas con un intervalo de confianza del 95% se encuentran entre  $[425.463, 456.537]$  con una media de  $441 \frac{j}{kg \cdot ^\circ C}$ . El calor específico que referencia la ASTM para el acero estructural A36 es de  $477 \frac{j}{kg \cdot ^\circ C}$ .

Por lo anterior el valor difiere en un 7.5%, cada medición de calor específico deberá ser ajustado de la siguiente forma:

$$C_{p \text{ ajustado}} = 1.075 \times C_p \quad (\text{Ec. 173})$$

### 3.4.3 Emisividad

Sobre una muestra de acero oxidado se tomaron cuatro muestras de emisividad. Los resultados obtenidos se muestran en la *Tabla 7*. El rango de las mediciones realizadas se muestra en el siguiente gráfico:



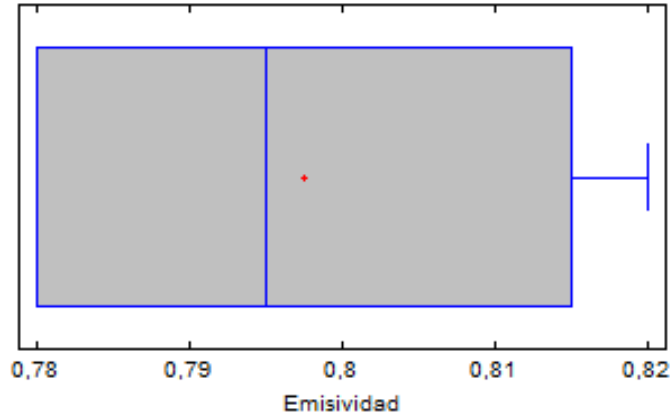


Figura 51 Diagrama de caja para los valores obtenidos en la medición de emisividad del ASTM A36

Las mediciones realizadas con un intervalo de confianza del 95% se encuentran entre  $[0.764, 0.830]$  con una media de  $0.7975 \frac{j}{kg \text{ } ^\circ C}$ . La emisividad que se referencia para el acero oxidado es de 0.8. Por lo anterior el cálculo de emisividad se encuentra ajustado.

## 4 MEDICIÓN DE PROPIEDADES DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS

### 4.1 IDENTIFICACIÓN DE MATERIALS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES

En el ejercicio de identificación de los tipos de materiales constructivos sobre los cuales se llevaría a cabo la caracterización térmica, fueron identificados cuatro tipos de sistema constructivos usados en el país: sistema de construcción tradicional, prefabricado, industrializado en formaleta y alternativos.

El *sistema de construcción tradicional* es el sistema de construcción más difundido, caracterizado por la solidez y la durabilidad; conformado por pórticos de acero o concreto, o muros de concreto o mampostería estructural.

En el sistema de *construcción prefabricado* se producen los componentes fuera de su ubicación final. Está dividido en tres tipos: sistemas de paneles, sistemas de cajón y sistemas de prefabricados estructurales.

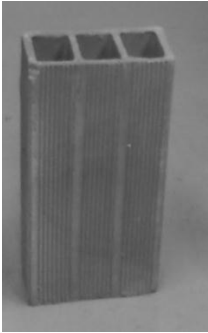

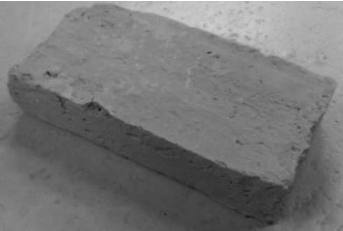
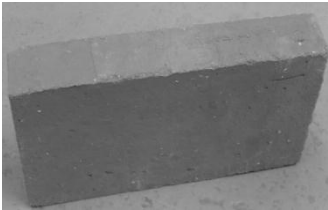

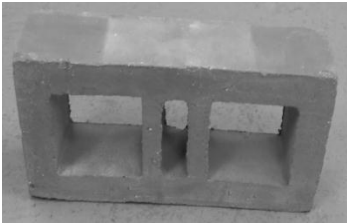
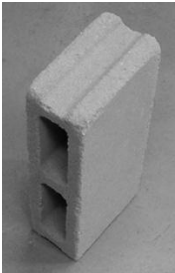

El *sistema de construcción industrializado en formaleta* conformado por muros de carga, en concreto armado, fundidos en sitio a base de encofrados de aluminio, permitiendo fundir muros y losas.



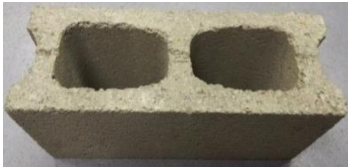

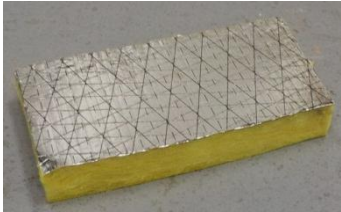
El *sistema alternativo* está constituido por elementos como troncos de madera, barro y ramas de árboles, difundido especialmente en zonas rurales del país.

La presente investigación toma por objeto de estudio los materiales constructivos que conforman el sistema de construcción tradicional. La selección de los materiales constructivos está determinada por el conocimiento de arquitectos y comerciantes del sector de la construcción en cuanto a su uso en las edificaciones.

A continuación se muestran aquellos materiales que fueron identificados como los de uso tradicional:

Tabla 9 Materiales constructivos tradicionales de Colombia seleccionados

n	DESCRIPCIÓN	FOTO	n	DESCRIPCIÓN	FOTO
1	Ladrillo #3 0.40x0.20x0.09 m		2	Ladrillo #5 0.40X0.20X0.15 m	
3	Ladrillo Común 0.17x0.08x0.04 m		4	Tolete Macizo #3 0.20 x0.10x0.03 m	
5	Prensado liviano 0.245x0.12x0.06 m		6	Tolete #3 estructural 0.24 x0.12x0.06 m	
7	Bloque de Cemento 0.35x0.15x0.09 m		8	Bloque de Cemento 0.40x0.20x0.15 m	

n	DESCRIPCIÓN	FOTO	n	DESCRIPCIÓN	FOTO
9	Bloque Split 0.15x0.19x0.39 m		10	Bloque Liso 0.09x0.19x0.39 m	
11	Bloque Liso 0.14x0.19x0.39 m		12	Bloque Liso #10 0.09x0.19x0.39 m	
13	Bloque Liso #15 0.14 x 0.19 x 0.39 m		14	Mortero 0.20x0.10x0.01m	
15	Fibra de Vidrio 0.20x0.10x0.025 m		16	Poliestireno Expandido (1) 0.20x0.10x0.03 m	
17	POLIESTIRENO EXPANDIDO (2) 0.20x0.23x0.016 cm				

## 4.2 RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN

Como se expuso en el capítulo anterior para cada material constructivo se tabulan las siguientes propiedades:

- Densidad aparente ,  $g/cm^3$
- Densidad por área,  $kg/cm^2$
- Masa,  $g$
- Masa de agua,  $g$
- Conductividad térmica,  $\frac{w}{m^{\circ}C}$
- Resistencia térmica,  $\frac{m^{2^{\circ}C}}{w}$
- Calor específico,  $\frac{j}{kg^{\circ}C}$
- Difusividad térmica,  $\frac{m^2}{s}$
- Emisividad

A continuación se muestran los resultados de un tipo de material constructivo para conocer la interpretación de cada estudio. El material en estudio será el **Bloque Liso** y se muestra a continuación:

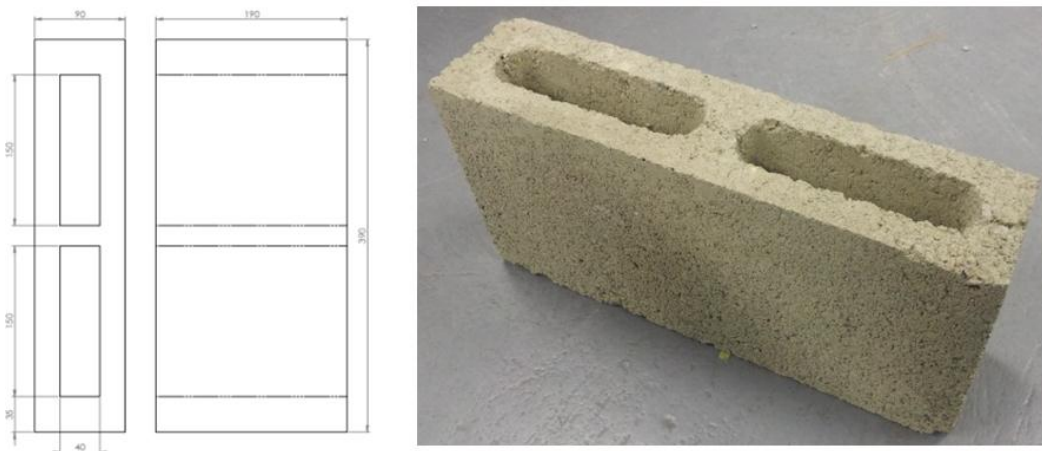


Figura 52 Bloque Liso de 0.09x0.19x0.39 m

Se enumeran las propiedades mencionadas:

### Densidad aparente

$$\rho_{Ap} = \frac{m_{total}}{V_{Total}} = \frac{9901 \text{ gr}}{(9 \times 19 \times 39) \text{ cm}^3} = 1.484 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \quad (\text{Ec. 174})$$

### Densidad por área

$$\rho_{Ar} = \frac{m_{total}}{A_{lateral}} = \frac{9.901 \text{ kg}}{(0.39 \times 0.19) \text{ m}^2} = 133.617 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad (\text{Ec. 175})$$

### Masa

$$m_{total} = 9.901 \text{ kg}$$



Figura 53 a) Masa del material bloque liso en condiciones de equilibrio de humedad b) Masa del material de bloque liso luego del proceso de secado

### Masa de agua

$$m_{agua} = 129 \text{ gr}$$

### Conductividad térmica

Una vez se realiza la prueba se obtiene en línea el comportamiento de la temperatura inferior del material y de la temperatura superior. De esta grafica se diferencian tres instantes de tiempo como se muestra a continuación:

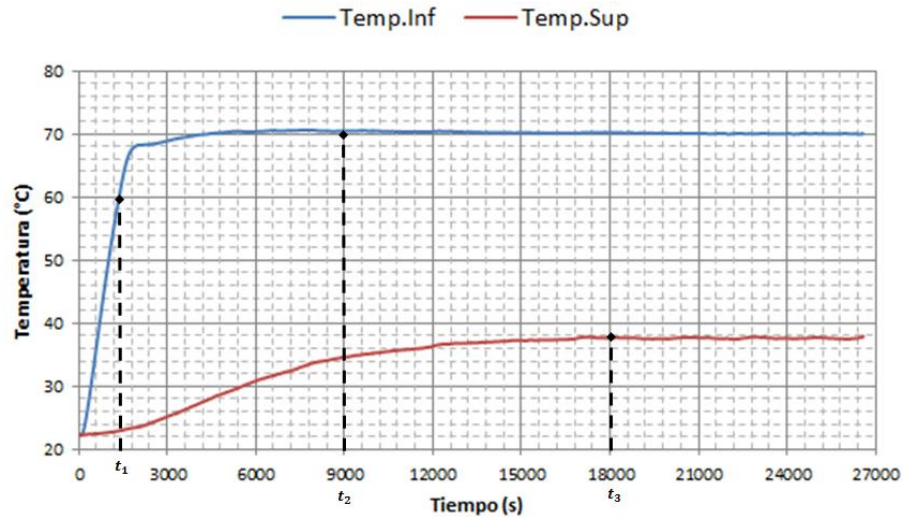


Figura 54 Comportamiento de temperaturas inferior y superior del bloque liso en la prueba de conductividad térmica

El tiempo transcurrido de 0 a  $t_1$  el cual es el tiempo que toma la superficie inferior en alcanzar 60°C, muestra el comportamiento de las temperaturas en estado transitorio con potencia constante, luego de este tiempo comienza a funcionar el controlador de potencia. Cuando se alcanza el tiempo  $t_2$  la temperatura inferior alcanza el estado estable. Cuando se alcanza el tiempo  $t_3$  la temperatura superior alcanza el estado estable. Luego que las temperaturas hayan alcanzado el estado estable se verifica la estabilidad de la potencia.

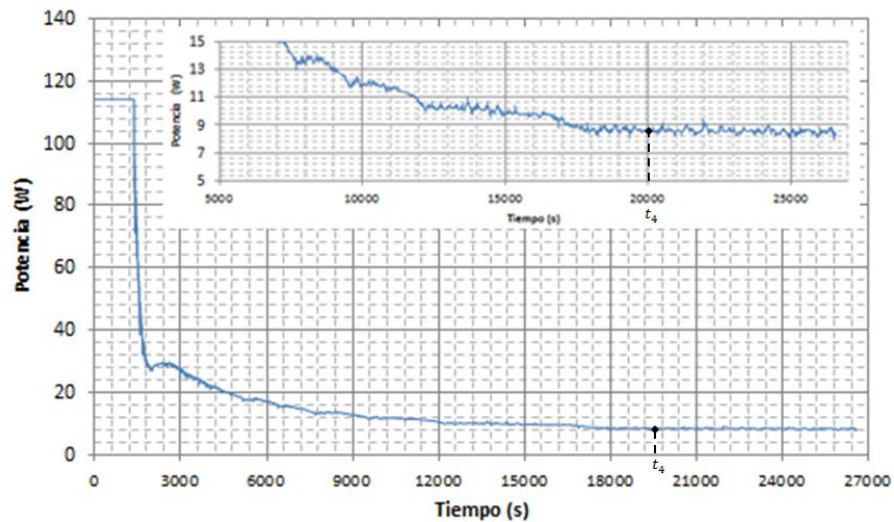


Figura 55 Comportamiento de la conductividad térmica del bloque liso en la prueba de conductividad térmica

Este tiempo,  $t_4$ , no necesariamente debe coincidir con algún tiempo de estabilización de la temperatura. En general es el mayor de los tiempos de estabilización. Una vez se verifica que las temperaturas y la potencia permanecen constante se calcula la conductividad promedio en la zona que ya se encuentra estable, es decir en tiempos mayores a  $t_4$ , en el caso estudiado  $0.499 \frac{w}{m^{\circ}C}$ .

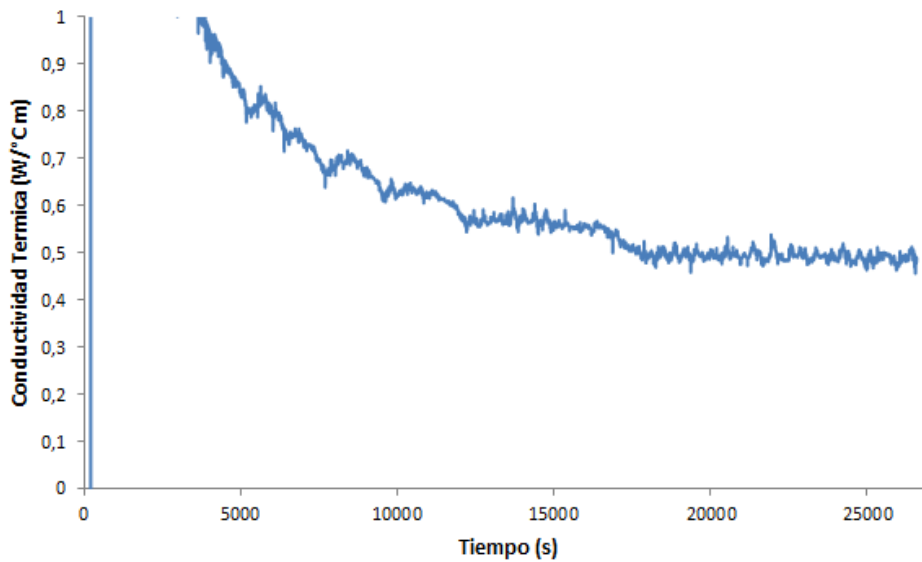


Figura 56 Comportamiento de la conductividad térmica del bloque liso en la prueba de conductividad térmica

### Resistencia térmica

$$R = \frac{L}{k} = \frac{0.09 \text{ m}}{0.499 \frac{w}{m^{\circ}C}} = 0.180 \frac{w}{^{\circ}C} \text{ (Ec. 176)}$$

### Calor específico

Tabla 10 Resultado de prueba de calor específico del bloque liso

Elemento Constructivo	Agua		Aire		Elemento constructivo			
	Temperatura Inicial (°C)	Masa (kg)	Altura (cm)	Masa (kg)	Temperatura Inicial (°C)	Masa (kg)	Temperatura Final (°C)	Calor específico (J/kg °C)
<b>Bloque Liso 9X19X39 cm</b>	29.7	10	10	0.012	200	9.593	58.3	<b>880</b>

### Difusividad térmica



$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} = \frac{0.499 \frac{W}{m^{\circ}C}}{1438 \frac{kg}{m^3} \times 880} = 0.394 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s} \quad (\text{Ec. 177})$$

### Emisividad

Cada material sometido a la prueba de emisividad con la cámara termográfica se configura de la siguiente forma con cinta aislante negra:

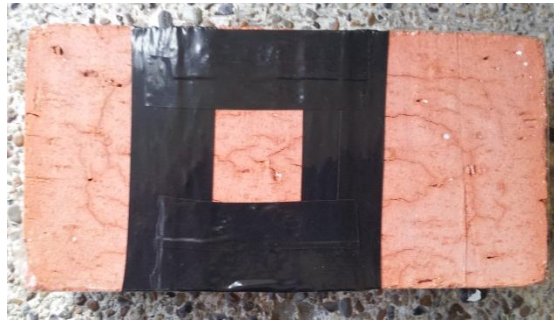


Figura 57 Configuración de materiales en prueba de emisividad

El valor de la emisividad de la cinta aislante es ajustado en 0.95 y se encuentra en valor de temperatura de esta zona, luego se ajusta el valor de la emisividad del material hasta que su temperatura sea la misma que la de la cinta aislante.

Tabla 11 Resultados de prueba de emisividad del bloque liso

Material	Emisividad ajustada 0.95	Emisividad del material	Emisividad
Bloque Liso 0.09X0.19X 0.39 m			0,84

A continuación se presentan los resultados de los 20 materiales constructivos analizados en esta investigación:

Materiales		Densidad g/cm <sup>3</sup>	Densidad Kg/m <sup>2</sup>	Masa (g)	Masa de agua (g)	Conductividad térmica (W/m °C)	Resistencia térmica (m <sup>2</sup> °C/ W)	Calor especifico (j/kg °C)	Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s) x 10 <sup>6</sup>	Emisividad
1	Ladrillo #3 0.40x0.20x0.09 m	0.713 ± 0.0133	64.175 ± 0.483	5134 ± 0.1	7 ± 0.1	0.189 ± 0.0231	0.475 ± 0.0635	836 ± 116	0.317 ± 0.09	0.86
2	Ladrillo #6 0.40x0.20x0.15 m	0.699 ± 0.00992	104.950 ± 0.788	8396 ± 0.1	93 ± 0.1	0.209 ± 0.0183	0.716 ± 0.0676	938 ± 117	0.319 ± 0.069	0.82
3	Ladrillo común 0.17x0.08x0.04 m	1.544 ± 0.0672	123.529 ± 3.829	840 ± 0.1	9 ± 0.1	1.033 ± 0.0827	0.116 ± 0.0041	709 ± 250	0.944 ± 0.137	0.83
4	Tolete macizo #3 0.20 x0.10x0.03 m	2.075 ± 0.100	207.516 ± 7.971	1245 ± 0.1	2.2 ± 0.1	0.437 ± 0.0522	0.0731 ± 0.0105	793 ± 180	0.266 ± 0.051	0.85
5	Prensado liviano 0.24x0.12x0.06 m	1.508 ± 0.0439	90.527 ± 1.127	2661 ± 0.1	2.8 ± 0.1	0.697 ± 0.0775	0.172 ± 0.0110	852 ± 171	0.542 ± 0.107	0.86
6	Tolete #3 estructural 0.24 x0.12x0.06 m	1.222 ± 0.0357	73.368 ± 0.920	2112 ± 0.1	1.1 ± 0.1	0.764 ± 0.0900	0.157 ± 0.0106	845 ± 208	0.740 ± 0.169	0.87
7	Bloque de cemento 0.35x0.15x0.09 m	1.152 ± 0.0238	103.700 ± 0.989	5444 ± 0.1	74 ± 0.1	0.540 ± 0.0364	0.166 ± 0.0131	847 ± 113	0.553 ± 0.070	0.84
8	Bloque de Cemento 0.40x0.20x0.15 m	0.915 ± 0.013	137.280 ± 1.031	10983 ± 1	192 ± 0.1	0.532 ± 0.0231	0.281 ± 0.0141	868 ± 83	0.670 ± 0.059	0.85
9	Bloque split 0.15x0.19x0.39 m	1.301 ± 0.0189	195.169 ± 1.529	14462 ± 1	245 ± 0.1	0.754 ± 0.0519	0.258 ± 0.0150	792 ± 66	0.732 ± 0.085	0.86

10	Bloque liso 0.9x0.19x0.39 m	$1.439 \pm 0.0281$	$133.617 \pm 1.047$	$9901 \pm 0.1$	$129 \pm 0.1$	$0.326 \pm 0.0259$	$0.275 \pm 0.0256$	$880 \pm 75$	$0.258 \pm 0.035$	0.84
11	Bloque liso 0.14X0.19X0.39 m	$0.998 \pm 0.0149$	$139.838 \pm 1.096$	$10362 \pm 1$	$88 \pm 0.1$	$0.453 \pm 0.0343$	$0.308 \pm 0.0256$	$955 \pm 89$	$0.475 \pm 0.074$	0.81
12	Bloque liso #10 0.9X0.19X0.39 m	$1.249 \pm 0.0236$	$112.416 \pm 0.881$	$8330 \pm 0.1$	$82 \pm 0.1$	$0.329 \pm 0.0259$	$0.288 \pm 0.0241$	$811 \pm 80$	$0.325 \pm 0.045$	0.85
13	Bloque liso #15 0.14 x 0.19 x 0.39 m	$1.285 \pm 0.0192$	$179.946 \pm 1.409$	$13334 \pm 1$	$303 \pm 0.1$	$0.497 \pm 0.0389$	$0.285 \pm 0.0241$	$833 \pm 71$	$0.464 \pm 0.063$	0.84
14	Mortero 0.40x0.20x0.015 m	$1.257 \pm 0.0930$	$19.800 \pm 0.149$	$1584 \pm 0.1$	$300 \pm 0.1$	$0.223 \pm 0.0254$	$0.0672 \pm 0.0121$	$744 \pm 70$	$0.238 \pm 0.046$	0.83
15	Fibra de Vidrio 0.40x0.20x0.025 m	$0.0895 \pm 0.00430$	$2.237 \pm 0.018$	$179 \pm 0.1$	-	$0.0314 \pm 0.00366$	$0.794 \pm 0.1247$	-	-	0.81
16	Poliestireno (1) 0.40x0.20x0.03 m	$0.0138 \pm 0.00601$	$0.415 \pm 0.004$	$33.2 \pm 0.1$	-	$0.0317 \pm 0.00460$	$0.946 \pm 0.1689$	-	-	0.84
17	Poliestireno (2) 0.18x0.15x0.016 m	$0.377 \pm 0.00350$	$0.596 \pm 0.011$	$16.1 \pm 0.1$	-	$0.0403 \pm 0.0061$	$0.397 \pm 0.0849$	-	-	0.86

### **4.3 DISEÑO DE EXPERIMENTO**

Las propiedades térmicas de los materiales constructivos son dependientes del proceso de fabricación. Factores como el tipo de material constitutivo, geometría, condiciones de fabricación (temperatura, presión y humedad) afectan el desempeño térmico final del material.

Actualmente un mismo tipo de material constructivo puede ser fabricado por distintas empresas que no necesariamente llevan a cabo el proceso de fabricación en las mismas condiciones e igualmente sus materias primas son diferentes a pesar de su cercanía geográfica. Por lo anterior las propiedades térmicas de un material de una referencia en específico pueden variar dependiendo del fabricante.

En caso que el factor fabricante no sea significativo para un tipo de material constructivo, sus propiedades térmicas pueden ser generalizadas y especificar únicamente el valor de la propiedad, en caso contrario deberá especificarse cada propiedad por fabricante.

A continuación se presenta el análisis realizado para el Ladrillo #3 en el cual se determina si el tipo de fabricante tiene alguna influencia en las propiedades medidas, se plantea un diseño de experimento de un factor, con 3 niveles y 4 réplicas.

#### **4.3.1 Factor de diseño**

El factor de diseño analizado es el fabricante del material constructivo, en el caso del Ladrillo#3 se encontraron tres fabricantes de este tipo de material:

- Sescaribe
- Ladrillera Barranquilla
- Morano

### 4.3.2 Variable de respuesta

La variable de respuesta para el análisis realizado es la conductividad térmica. Este procedimiento debe realizarse para cada una de las propiedades obtenidas.

### 4.3.3 Variable con variación permitida

La temperatura ambiente afecta el valor de la conductividad térmica, por tal motivo cada vez que se realiza una prueba se verifica que la temperatura del medio se encuentre entre 22 y 24°C.

### 4.3.4 Diseño de experimento

Se lleva a cabo un experimento de un factor usando un equipo de conductividad térmica de materiales fuera de norma ubicado en el laboratorio de máquinas hidráulicas de la Universidad del Norte para estudiar la influencia que tiene el tipo de fabricante en la conductividad térmica del ladrillo #3. El experimento tiene un factor de 3 niveles y 4 réplicas. Las 12 muestras se hicieron en orden aleatorio para evitar variables perturbadoras desconocidas:

Tabla 12 Secuencia de experimentación

Fabricante	Número de corrida experimental			
	1	2	3	4
Sescaribe	4	11	12	9
Ladrillera Barranquilla	10	1	5	2
Morano Gres	6	3	7	8

Una vez realizados los experimentos se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 13 Resultados de pruebas de experimento

Fabricante	Observaciones			
	1	2	3	4
Sescaribe	0,212	0,215	0,213	0,213
Ladrillera Barranquilla	0,159	0,159	0,163	0,160
Morano Gres	0,168	0,161	0,166	0,168

La siguiente se resume el análisis de varianza de los datos:

Tabla 14 Tabla ANOVA de experimento

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	0,0048065	2	0,00240325	9,48	0,0061
Intra grupos	0,0022815	9	0,0002535		
Total (Corr.)	0,007088	11			

Se probarán los supuestos de normalidad e independencia para los residuales de los datos obtenidos, así como el de homocedasticidad. En la siguiente figura se presenta las respectiva gráfica de normalidad de los residuales.

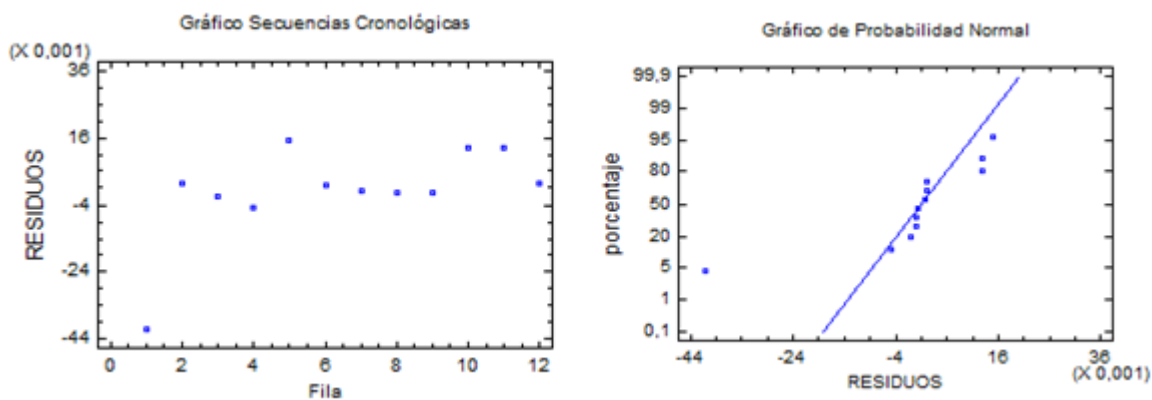


Figura 58 Gráficos de independencia y probabilidad normal de experimento

No se presenta sospecha de incumplimiento de los supuestos de normalidad e independencia.

Basados en los resultados obtenidos el factor fabricante es influyente en el valor de la conductividad térmica,

## 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La carencia de valores de propiedades térmicas de materiales constructivos usados comúnmente en Colombia fue abordada en esta tesis mediante la realización de métodos de medición basados en teoría básica de transferencia de calor. Para esto se desarrolló un equipo de medición de conductividad térmica sobre el cual se realizaron estudios de propagación de error, análisis de capacidad de mediciones, atributos metrológicos y validación de resultados, el cual cuenta con un sistema de control y adquisición de datos propios. Además fueron realizados métodos para medición de calor específico, difusividad y emisividad sobre los cuales fueron realizados los estudios anteriormente mencionados. Cada método usado posee limitantes propias de la naturaleza del fenómeno medido y pueden presentar mejoras en cuanto a la instrumentación.

Los materiales constructivos evaluados pueden ser divididos en 3 categorías, aislamientos térmicos, bloques de arcilla y bloques de hormigón. Para clasificar los resultados obtenidos se relacionan con la división realizada por la ASHRAE de tipo de paredes, las cuales son clasificadas por su desempeño térmico y características físicas en paredes tipo A, B, C, D, E, F y G.

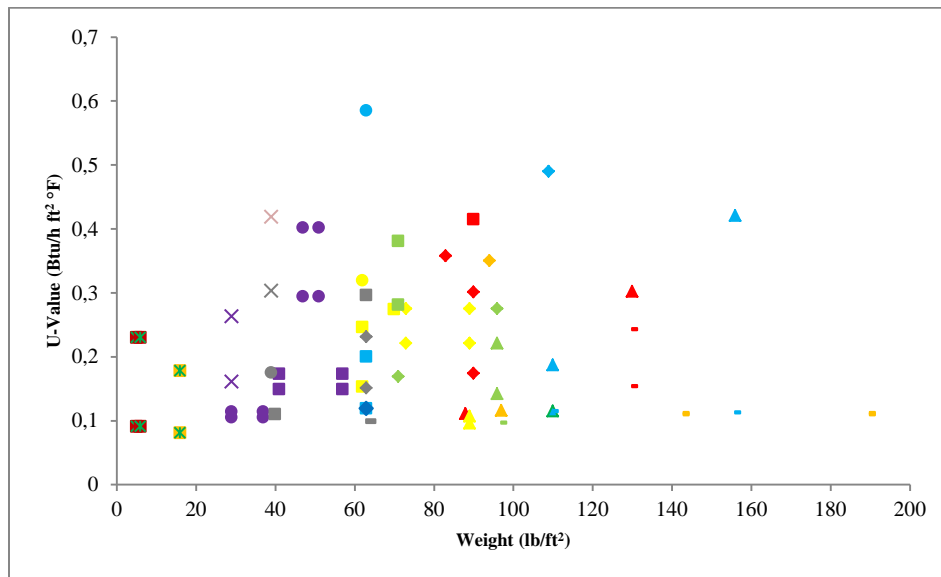


Figura 59 Valor de propiedades térmicas de conjuntos constructivos aceptados por la ASHRAE

La anterior grafica presenta el total de materiales considerado por el manual ASHRAE, aquí se relacionan el peso por área construida y el coeficiente de transferencia de calor (inverso de la resistencia térmica).

De la primera categoría fueron evaluados 3 materiales constructivos: fibra de vidrio con foil de aluminio y dos tipos de poliestireno expandido de distinta densidades. El comportamiento térmico de la fibra de vidrio y del poliestireno expandido de menor densidad es acorde con los estándares de mercados internacionales y presentaron las resistencias térmicas más elevadas de los materiales evaluados, son considerado componentes de paredes tipo G en la calificación dada por la ASHRAE.

De la segunda categoría fueron evaluados 6 materiales constructivos y son divididos en dos grupos, bloques macizos (4) y bloques con espacios de aires (2). Los bloques de arcilla macizos presentaron el desempeño más bajo térmicamente de todas las mediciones, tanto que no existe clasificación para este grupo en las paredes concebidas para una edificación por la ASHRAE, teniendo una resistencia térmica de hasta 4 veces menor que la del material con menos capacidad considerado por esta entidad. Los bloques arcilla con espacios de aire presentaron el segundo mejor desempeño térmico, teniendo mejor desempeño aquel materiales que posee mayor cantidad de espacio de aire. El ladrillo #6 es considerado como un componente parte de un pared tipo F y el ladrillo #3 componente de una pared tipo E.

En la tercera categoría fueron evaluados 7 materiales constructivos de los cuales ninguno tiene clasificación ASHRAE al poseer resistencias térmicas menores a la más baja tabulada, no obstante en promedio poseen un conductividad cercana a las paredes tipo E.

En la siguiente grafica se presentan los materiales constructivos evaluados que poseen un coeficiente de transferencia menor a la unidad junto con los presentados en el manual de la ASHRAE:



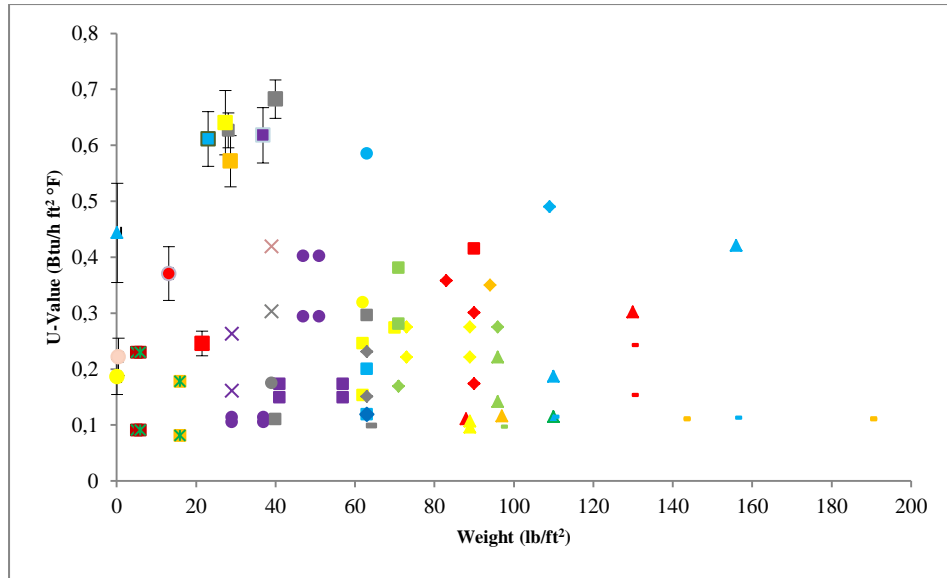


Figura 60 Comparación de materiales constructivos propios con elementos internacionales

Como es evidente de los materiales constructivos evaluados únicamente los clasificados como aislamientos térmicos y dos ejemplares de los ladrillos de arcillas poseen un coeficiente de transferencia de calor semejante al estándar. Por lo anterior se recomienda el uso del ladrillo #6 y #3 con combinaciones con aislamiento térmico tipo fibra de vidrio o poliestireno para las envolventes.

Posteriormente fue realizado un diseño de experimento de un factor, de tres niveles y 4 réplicas para un tipo de bloque. Concluyendo que el tipo de fabricante es significativo sobre los valores de la conductividad térmica del material constructivo, lo cual indica que se debe dar un proceso de estandarización en los procesos de fabricación de los componentes para envolventes desde el punto de vista térmico.

## 6 CONCLUSIONES

Se identificó que los materiales de construcción que poseen el mejor desempeño térmico son: ladrillo #3, ladrillo #6, poliestireno expandido y fibra de vidrio. Por ende es recomendable su uso, y la construcción de materiales constructivos compuestos que los involucren entre ellos.

Los bloques de hormigón evaluados no poseen una resistencia térmica aceptable por la entidad internacional de la ASHRAE para envolventes, en caso de su uso es recomendable la construcción de elementos constructivos compuestos que involucren el uso de aislante térmico, mortero u otros materiales constructivos simples.

Los bloques de arcilla macizos presentaron el desempeño más bajo térmicamente de todas las mediciones, por esto no es recomendable su uso para envolvente.

Basados en el diseño de experimento realizado se identificó que se debe dar un proceso de estandarización en los procesos de fabricación de los componentes para envolventes desde el punto de vista térmico.

## 7 REFERENCIAS

- [1] D. de F. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, “Caracterización del consumo de energía final en los sectores terciario, grandes establecimientos comerciales, centros comerciales y determinación de consumos para sus respectivos equipos de uso de energía final.,” Bogotá, 2007.
- [2] J. C. Lam, D. H. W. Li, and S. O. Cheung, “An analysis of electricity end-use in air-conditioned office buildings in Hong Kong,” *Building*, vol. 38, pp. 493–498, 2003.
- [3] R. Saidur, “Energy consumption, energy savings, and emission analysis in Malaysian office buildings,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 10, pp. 4104–4113, Oct. 2009.
- [4] M. Fasiuddin and I. Budaiwi, “HVAC system strategies for energy conservation in commercial buildings in Saudi Arabia,” *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 12, pp. 3457–3466, Dec. 2011.
- [5] T. Ramesh, R. Prakash, and K. K. Shukla, “Life cycle energy analysis of a residential building with different envelopes and climates in Indian context,” *Applied Energy*, vol. 89, no. 1, pp. 193–202, Jan. 2012.
- [6] J. Iwaro and A. Mwashu, “A review of building energy regulation and policy for energy conservation in developing countries,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 12, pp. 7744–7755, Dec. 2010.
- [7] Ministerio de Minas y Energía de la República de Colombia, *Resolución número 18-0919*. 2010, pp. 1–2.
- [8] *Programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales - PROURE, Plan de acción 2010-2015, Resumen ejecutivo*. 2010.
- [9] Omar Fredy Prias Caicedo, “Programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales - PROURE,” 2010.
- [10] PROURE, *ABC de Uso Racional y Eficiente de Energía en Edificaciones*. 2009, p. 2.
- [11] a. J. Marszal, P. Heiselberg, J. S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, and a. Napolitano, “Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies,” *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 4, pp. 971–979, Apr. 2011.
- [12] P. Norton and C. Christensen, “A Cold-Climate Case Study for Affordable Zero Energy Homes Preprint,” *Energy*, no. July, 2006.
- [13] M. Noguchi, A. Athienitis, J. Ayoub, and B. Berneche, “Net Zero Energy Homes of the Future : A Case Study of the ÉcoTerra House in Canada,” *Renewable Energy*, 2008.

- [14] M. Heinze and P. K. Voss, "GOAL : ZERO ENERGY BUILDING Exemplary Experience Based on the Solar Estate Solarsiedlung Freiburg am Schlierberg , Germany," *Building Design*, vol. 4, no. 4, pp. 1–8, 2009.
- [15] E. Musall, T. Weiss, K. Voss, and A. Lenoir, "Net Zero Energy Solar Buildings : An Overview and Analysis on Worldwide Building Projects," *Buildings*, pp. 7–8.
- [16] W. Zeiler and G. Boxem, "Net-zero energy building schools," *Renewable Energy*, pp. 2–6, Feb. 2012.
- [17] K. Voss, M. Riley, C. A. Athienitis, C. Boonstra, D. Crawley, M. Donn, F. Garde, P. Torcellini, and M. Wall, "IEA Joint Project : Towards Net Zero Energy Solar Buildings," *Advances*, no. February, 2009.
- [18] S. Deng, a. Dalibard, M. Martin, Y. J. Dai, U. Eicker, and R. Z. Wang, "Energy supply concepts for zero energy residential buildings in humid and dry climate," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 6, pp. 2455–2460, Jun. 2011.
- [19] L. Wang, J. Gwilliam, and P. Jones, "Case study of zero energy house design in UK," *Energy and Buildings*, vol. 41, no. 11, pp. 1215–1222, Nov. 2009.
- [20] T. Zero and C. Development, "Building A Greener Future:," *Communities*, no. December, 2006.
- [21] S. Pless and P. Torcellini, "Getting to Net Zero," *Energy*, no. September, 2009.
- [22] European Parliament, "The European parliament and the council of the European union on," *Regulation*, pp. 13–35, 2010.
- [23] X. Wang, D. Chen, and Z. Ren, "Global warming and its implication to emission reduction strategies for residential buildings," *Building and Environment*, vol. 46, no. 4, pp. 871–883, Apr. 2011.
- [24] T. Frank, "Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland," *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 11, pp. 1175–1185, Nov. 2005.
- [25] X. Wang, D. Chen, and Z. Ren, "Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia," *Building and Environment*, vol. 45, no. 7, pp. 1663–1682, 2010.
- [26] W. Miller and L. Buys, "Anatomy of a sub-tropical Positive Energy Home (PEH)," *Solar Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 231–241, Jan. 2012.
- [27] P. Torcellini, S. Pless, and M. Deru, "Zero Energy Buildings : A Critical Look at the Definition Preprint," *Energy*, 2006.

- [28] M. T. Iqbal, "A feasibility study of a zero energy home in Newfoundland," *Renewable Energy*, vol. 29, no. 2, pp. 277–289, Feb. 2004.
- [29] S. Rosta, R. Hurt, R. Boehm, and M. J. Hale, "Performance of a Zero-Energy House," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 130, no. 2, p. 021006, 2008.
- [30] P. Hernandez and P. Kenny, "From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB)," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 6, pp. 815–821, Jun. 2010.
- [31] W. Gilijamse, "Zero -energy house in the Netherlands Building performance Wim . Gilijamse," *Building*, Wisconsin, USA, 1995.
- [32] I. Sartori, A. Napolitano, and K. Voss, "Net zero energy buildings: A consistent definition framework," *Energy and Buildings*, vol. 48, pp. 220–232, May 2012.
- [33] C. Peng, Y. Huang, and Z. Wu, "Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 12, pp. 3592–3598, Dec. 2011.
- [34] R. H. Crawford, G. J. Treloar, R. J. Fuller, and M. Bazilian, "Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems (BiPVs) with heat recovery unit," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, no. 6, pp. 559–575, 2006.
- [35] P. Ihm, A. Nemri, and M. Krarti, "Estimation of lighting energy savings from daylighting," *Building and Environment*, vol. 44, no. 3, pp. 509–514, Mar. 2009.
- [36] L. Doulos, A. Tsangrassoulis, and F. Topalis, "Quantifying energy savings in daylight responsive systems: The role of dimming electronic ballasts," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 1, pp. 36–50, 2008.
- [37] E. S. Lee, D. L. DiBartolomeo, and S. E. Selkowitz, "Daylighting control performance of a thin-film ceramic electrochromic window: Field study results," *Energy and Buildings*, vol. 38, no. 1, pp. 30–44, Jan. 2006.
- [38] J. C. Lam, "Energy analysis of commercial buildings in subtropical climates," *Building and Environment*, vol. 35, no. 1, pp. 19–26, 2000.
- [39] M. M. Rahman, M. G. Rasul, and M. M. K. Khan, "Energy conservation measures in an institutional building in sub-tropical climate in Australia," *Applied Energy*, vol. 87, no. 10, pp. 2994–3004, Oct. 2010.
- [40] W. L. Lee and J. Burnett, "Benchmarking energy use assessment of HK-BEAM, BREEAM and LEED," *Building and Environment*, vol. 43, no. 11, pp. 1882–1891, Nov. 2008.
- [41] S. Roberts, "Altering existing buildings in the UK," *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4482–4486, 2008.

- [42] Minergie® Head Office, "The MINERGIE -Standard for Buildings," *Building*. MINERGIE, 2011.
- [43] E. Gaucher, "High Environmental Quality (HQE), the GIAcADEME approach," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 123, no. 5, p. 3203, 2008.
- [44] Cascadia Region Green Building Council, "The Living Building Challenge," *Challenge*, no. August, 2008.
- [45] ANSI/ASHRAE/IES, *Standard 90.1-Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. 2013.
- [46] S. B. Sadineni, S. Madala, and R. F. Boehm, "Passive building energy savings: A review of building envelope components," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 8, pp. 3617–3631, Oct. 2011.
- [47] L. Zalewski, M. Chantant, S. Lassue, and B. Duthoit, "Experimental thermal study of a solar wall of composite type," *Energy and Buildings*, vol. 25, no. 1, pp. 7–18, 1997.
- [48] K. S. Al-Jabri, A. W. Hago, A. S. Al-Nuaimi, and A. H. Al-Saidy, "Concrete blocks for thermal insulation in hot climate," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 8, pp. 1472–1479, 2005.
- [49] M. Ciampi, F. Leccese, and G. Tuoni, "Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings," *Solar Energy*, vol. 75, no. 6, pp. 491–502, 2003.
- [50] A. Athienitis, "Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage," *Building and Environment*, vol. 32, no. 5, pp. 405–410, 1997.
- [51] P. D. Robinson and M. G Hutchins, "Advanced glazing technology for low energy buildings in the UK," *Renewable Energy*, vol. 5, no. 1–4, pp. 298–309, 1994.
- [52] P. Chand, "Passive Cooling Techniques of Buildings : Past and Present – A Review," *Library*, vol. 4, no. 1, pp. 37–46, 2008.
- [53] A. M. Papadopoulos, "State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments," *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 1, pp. 77–86, 2005.
- [54] C. Luo, B. Moghtaderi, S. Hands, and a. Page, "Determining the thermal capacitance, conductivity and the convective heat transfer coefficient of a brick wall by annually monitored temperatures and total heat fluxes," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 2–3, pp. 379–385, Feb. 2011.
- [55] W. Y. S. S. J. T. P. Winter, "Determination of Thermal Conductivity, Specific Heat and Thermal Diffusivity of Storage Seeds," 2002.

- [56] B. Yesilata and P. Turgut, "A simple dynamic measurement technique for comparing thermal insulation performances of anisotropic building materials," *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 9, pp. 1027–1034, 2007.
- [57] A. Franco, "An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, no. 14–15, pp. 2495–2504, Oct. 2007.
- [58] C. S. Sanjaya, T.-H. Wee, and T. Tamilselvan, "Regression analysis estimation of thermal conductivity using guarded-hot-plate apparatus," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 10, pp. 1566–1575, Jul. 2011.
- [59] A. A. Luai M. Al-Hadhrami, "Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia," 2008.
- [60] W. C. Thomas and R. R. Zarr, "Thermal response simulation for tuning PID controllers in a 1016 mm guarded hot plate apparatus.," *ISA Transactions*, vol. 50, no. 3, pp. 504–512, 2011.
- [61] K. Ghazi Wakili, "U-value of a dried wall made of perforated porous clay bricks Hot box measurement versus numerical analysis," *Energy and Buildings*, vol. 35, no. 7, pp. 675–680, 2003.
- [62] A. F. M. P. Michael Shawyer, "El uso de hielo en pequeñas embarcaciones de pesca," 2005.

## **ANEXOS**

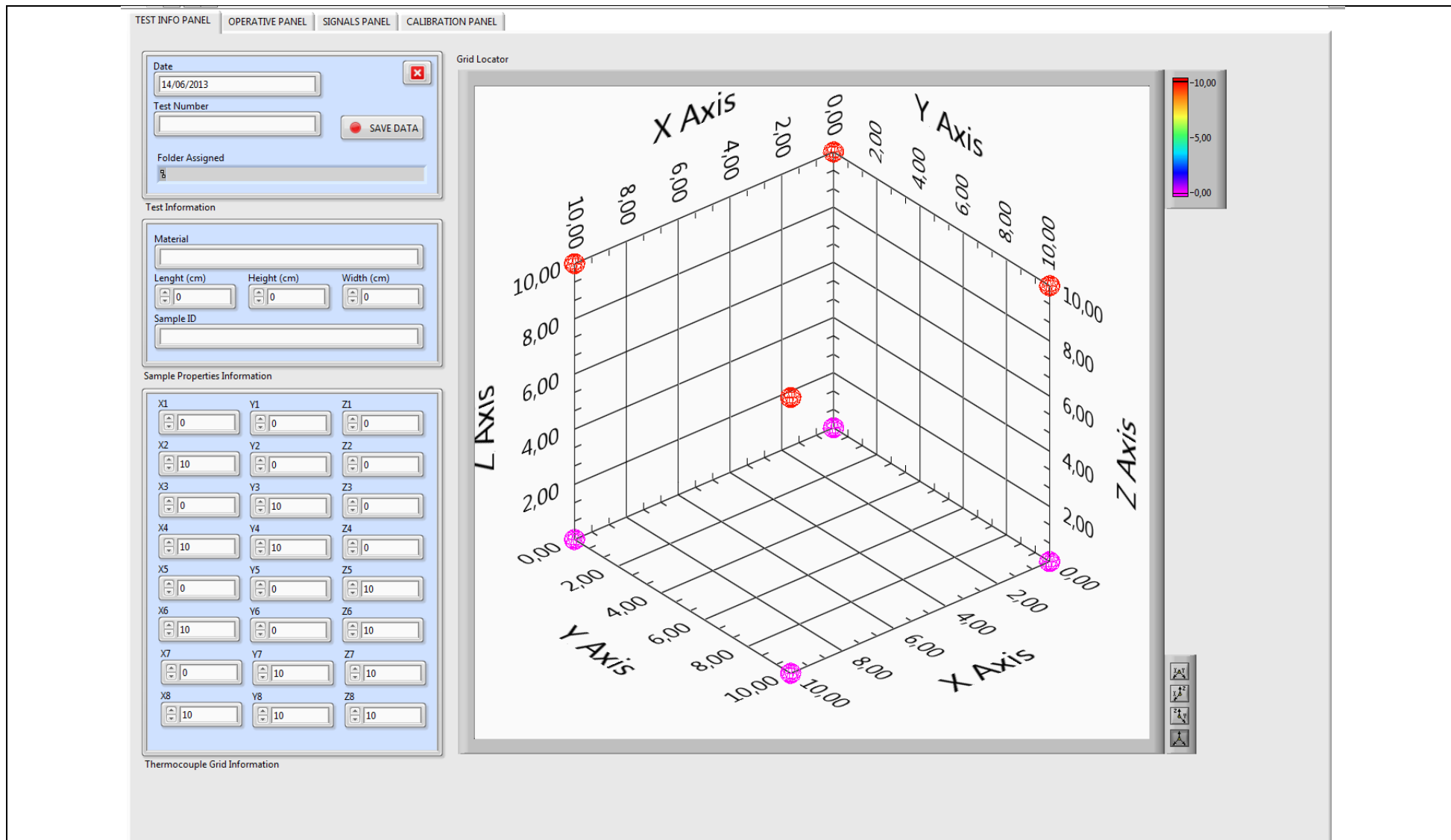
### **ANEXO A- Funcionamiento de la interfaz gráfica del sistema de control del equipo de medición de conductividad térmica.**

El sistema de control y la interfaz gráfica del equipo de medición de conductividad térmica es presentado como el aporte más significativo en cuanto a desarrollo tecnológico de esta tesis de maestría.

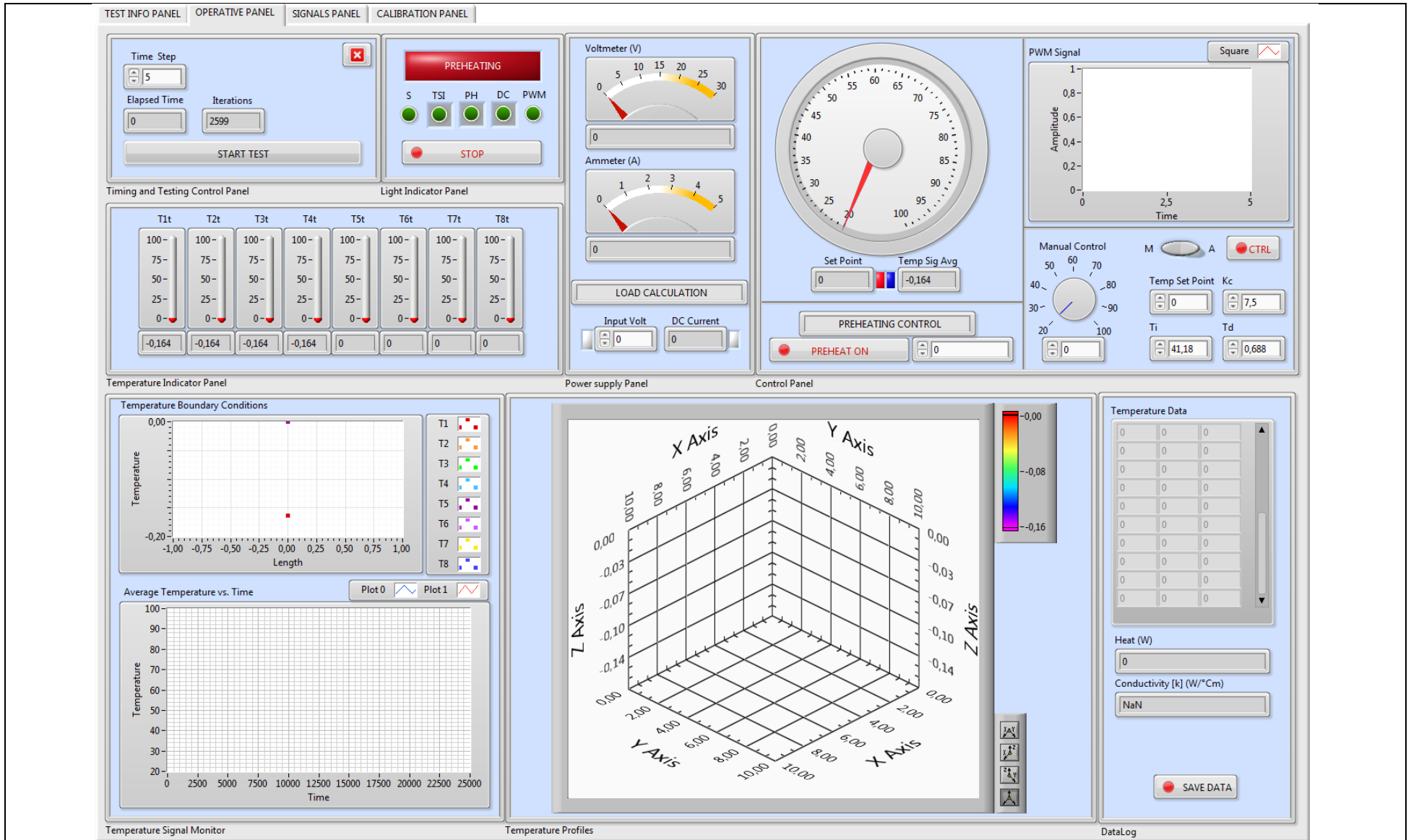
El reto constructivo del equipo fue abordado por el Ing. Horacio Pinzón y por la Ing. María Alejandra Dávila, los cuales escribieron la primera parte de este anexo.

Es para destacar que actualmente el equipo de medición de conductividad térmica está siendo utilizado por el Centro Integrado de Materiales y Manufactura en consultorías para certificación de nuevos materiales de construcción fuera de normas.

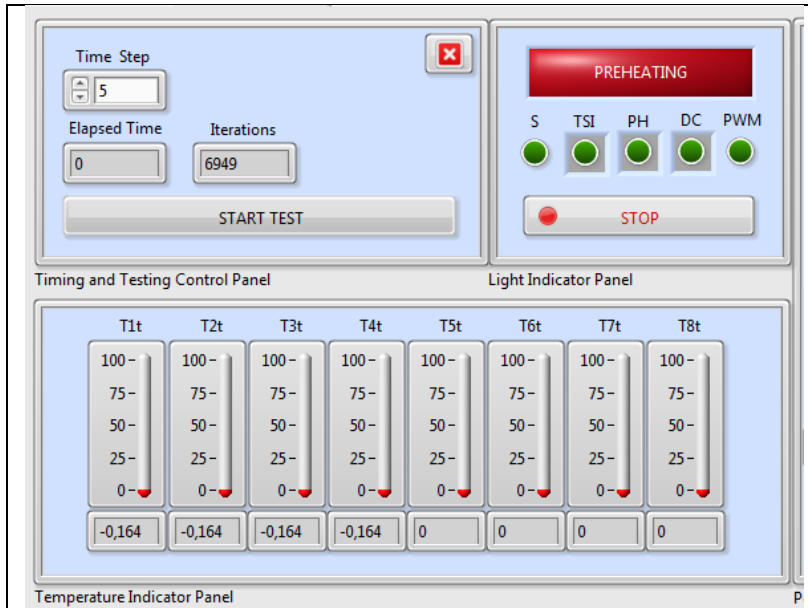




**Panel de Información del experimento:** Permite ingresar y almacenar información del experimento de una manera rápida que incluye: fecha, número del experimento, material y su descripción o identificación de la muestra, dimensiones y una ubicación geográfica de la distribución de sensores de temperatura. Para observar dicha distribución se proporciona un visor en 3 dimensiones y 3 grados de libertad de movimiento. El botón “SAVE DATA” guarda esta información en 3 archivos “.txt” de acceso fácil en cualquier entorno de programación comercial actual. Dicha información se guarda en una carpeta con el nombre del experimento de forma automática.



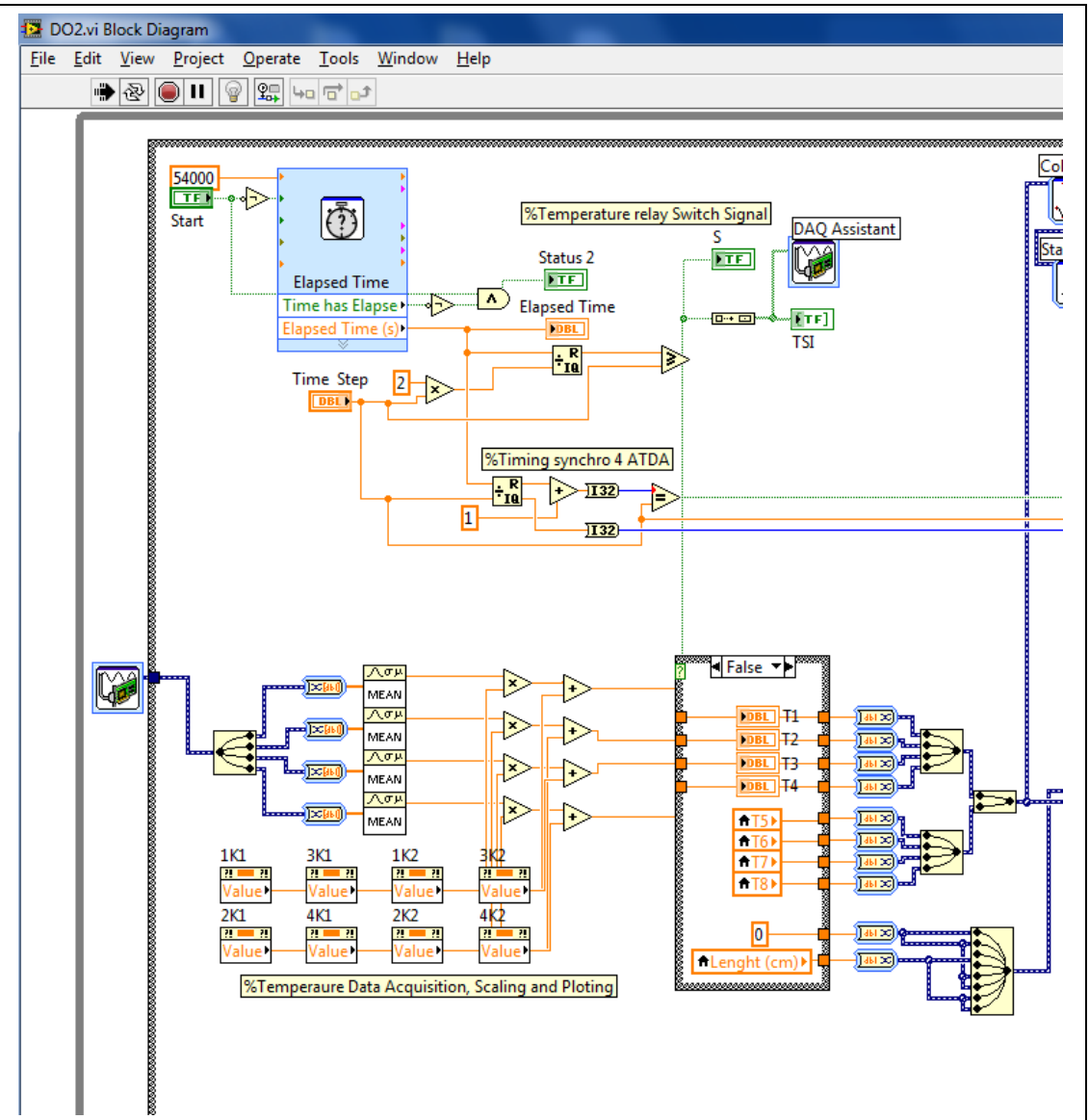
**Panel operativo del experimento:** Diseñado para ser el entorno natural de intercambio de información entre el usuario y la maquina durante una prueba. Proporciona información en tiempo real de todas las señales, estado actual de los actuadores eléctricos, perfiles de temperatura, temperatura en el tiempo y por cada sensor. Información con más detalles acerca de los principales paneles la encontrara a continuación.

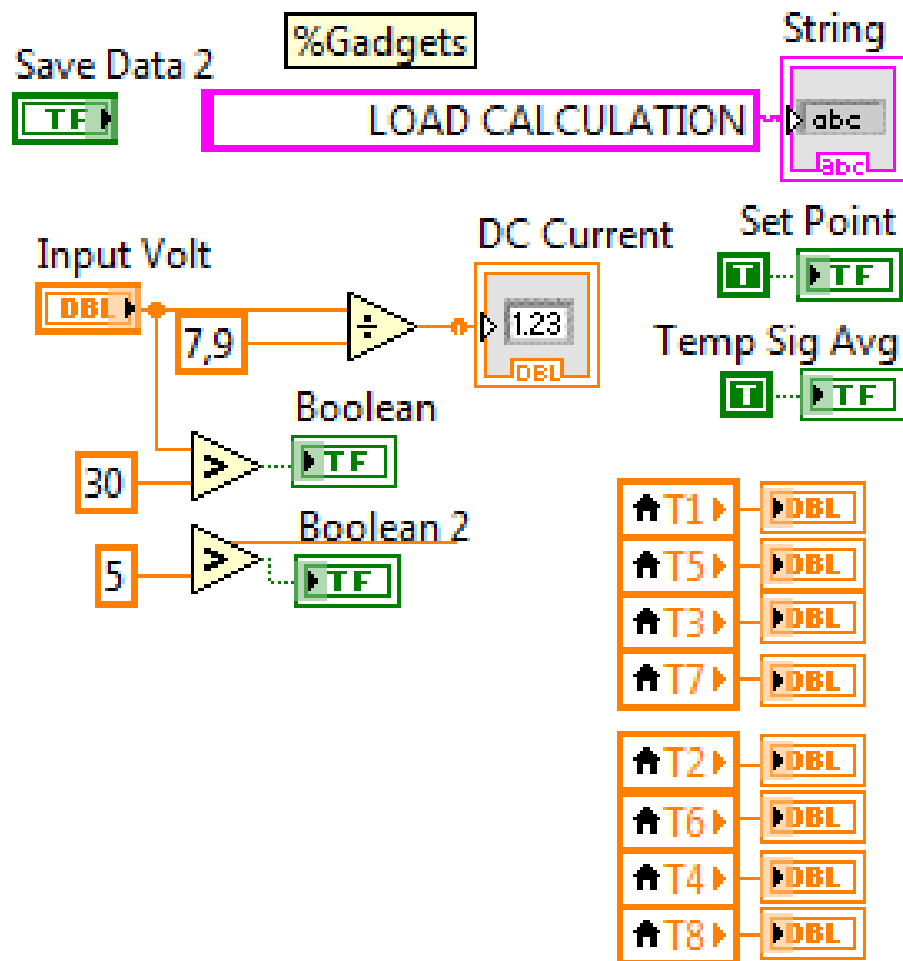
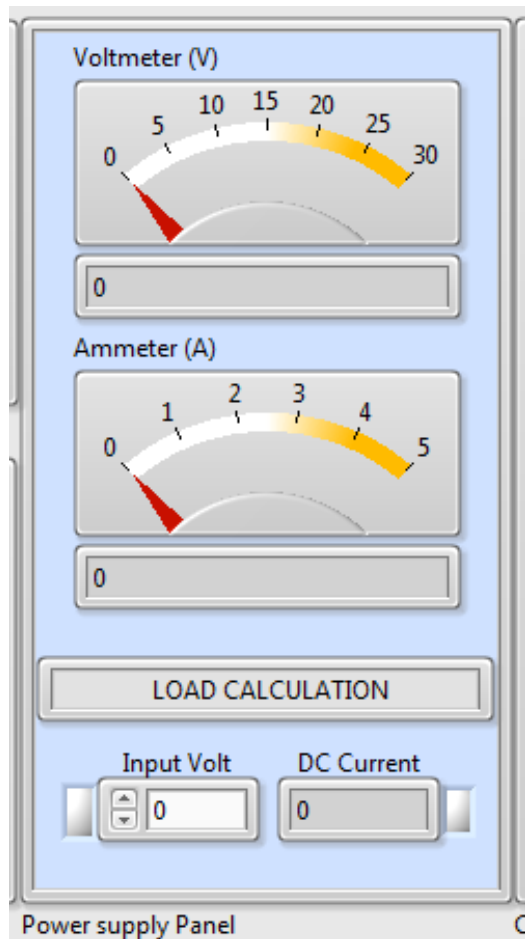


**Paneles de indicadores luminosos, indicadores de temperatura y control de inicio de experimento:**

El panel de control de inicio de experimento (Timing and testing control panel), tal como su nombre lo indica, da inicio al test una vez las condiciones de seguridad han sido verificadas por el usuario. Este panel cuenta con indicación de tiempo transcurrido, tiempo de muestreo e iteraciones de la computadora. Por último el botón rojo con una “x” es un botón de parada de emergencia, al ser presionado interrumpe toda actividad de manera inmediata.

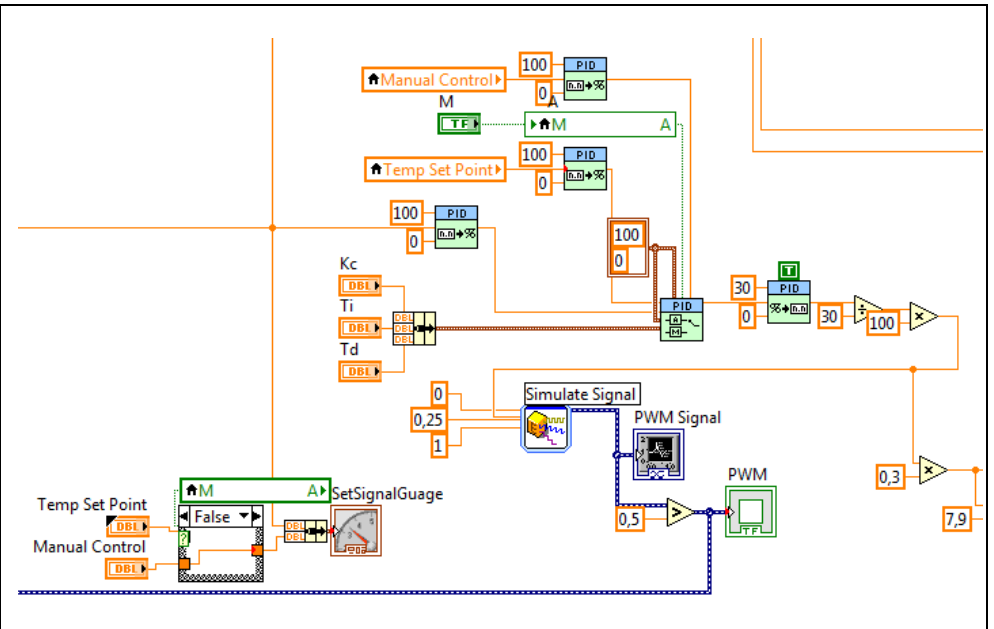
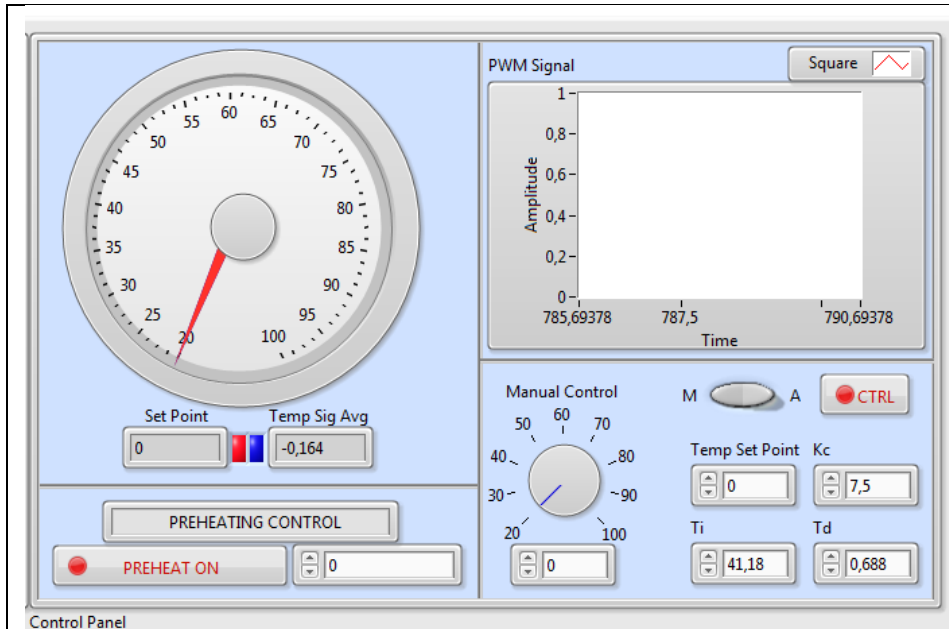
Los paneles de indicación fueron diseñados para monitorear cada uno de los actuadores (“Light indicator panel”) y los valores de las temperaturas de los 8 sensores instalados (Temperature Indicator Panel). El panel de indicación luminosa brinda información sobre los relés del circuito DC de control (DC), circuito de precalentamiento (PH), modulación por ancho de pulso (PWM) y control de cambio de lectura de termopares (S y TSI). A mano derecha se encuentra el código que controla tales funciones.



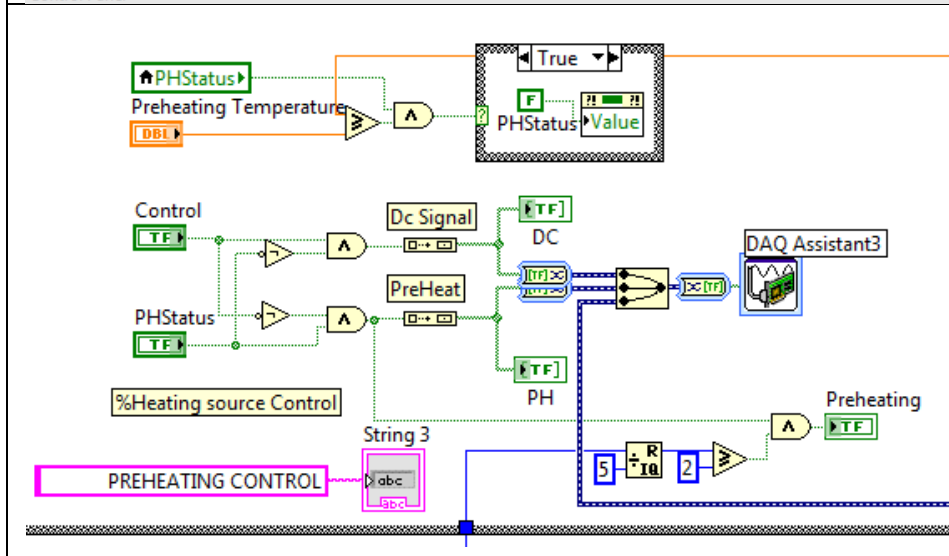


**Panel de monitoreo de fuente y calculo de consumo de corriente:**

Este panel fue diseñado para proporcionar información sobre el consumo de corriente en la fuente BK PRECISION mod 1671<sup>a</sup> utilizada en el experimento. Proporciona información acerca del voltaje promedio y consumo de corriente promedio para una condición de carga fijada por el panel de control. Además cuenta con una calculadora que permite estimar el consumo de corriente para una condición de voltaje, pensado para la rutina de precalentamiento donde el nivel del voltaje puede llegar a 120 V RMS.



**Panel de control:** diseñado para controlar la temperatura de la mesa metálica donde se asienta un elemento arquitectónico. Compuesto de 4 partes descritas a continuación: En la parte izquierda superior del panel encontramos un indicador de caratula que proporciona información de la temperatura deseada y el valor de la temperatura de proceso. La temperatura de proceso se toma como el promedio de las temperaturas procedentes de los termopares ubicados en la parte inferior del elemento arquitectónico (en contacto directo con la placa metálica). En la parte izquierda inferior del panel se encuentra el control de rutina de precalentamiento que permite un calentamiento inicial rápido con corriente AC y un nivel de voltaje RMS cercano a las 50 V; esta rutina de precalentamiento posee una rutina de seguridad bastante robusta descrita en el diagrama de bloques en el recuadro inferior izquierdo de esta tabla. En la parte derecha inferior del panel encontramos los botones de comando regular de un PID con una perilla de control manual, botón de cambio a manual a automático, activación del modulo del control (CTRL), valor de consigna y parámetros del controlador ajustables. Dichos valores fueron ajustados a partir de una identificación con paso escalón y una sintonía lambda prima. La rutina que describe este procedimiento se encuentra en la parte superior derecha de esta tabla. Por último en la parte derecha superior del panel encontramos una grafica que permite observar la señal de modulación por ancho de pulso.



**Temperature Data**

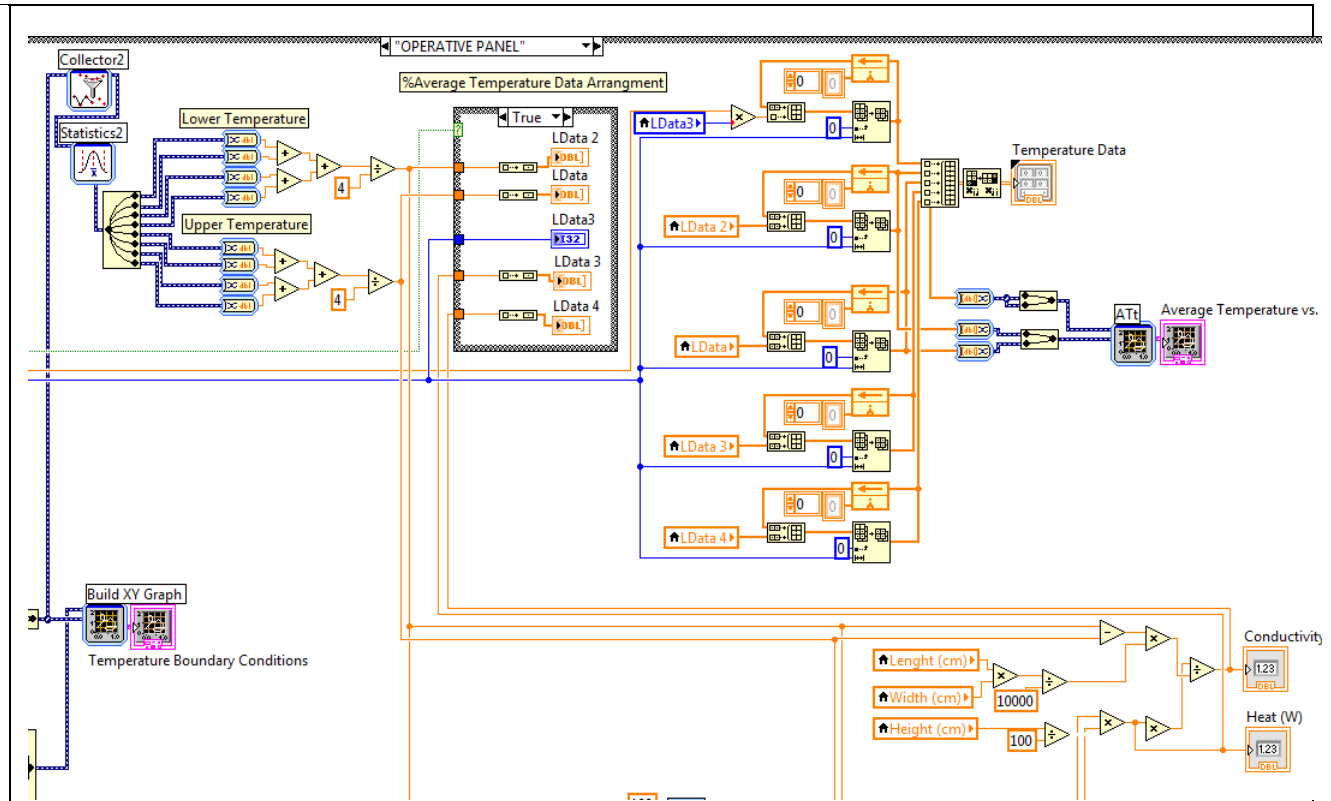
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0

**Heat (W)**  
0

**Conductivity [k] (W/°Cm)**  
NaN

**SAVE DATA**

DataLog



**Panel de almacenamiento de información térmica:** Diseñado para mostrar y almacenar información relativa a temperatura en el tiempo, calor suministrado en el tiempo, conductividad térmica en el tiempo. Cuando se presiona "SAVE DATA" la información es almacenada con un archivo ".txt" compatible con cualquier software de programación comercial actual, en la misma carpeta creada inicialmente en el módulo de información de experimento.

## 1.1. Modo de funcionamiento

- **Softwares Requeridos**

La aplicación desarrollada para el sistema de control y monitoreo del equipo de medición de propiedades térmicas, integra el funcionamiento de dos software adquiridos por la Universidad del Norte, STEP 7 y Labview 2011.

- **Archivos Requeridos**

Es suministrado una carpeta con los siguientes archivos:

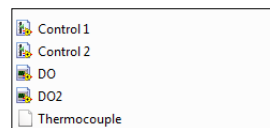


Figura 61 Contenido de carpeta de ejecución de equipo de conductividad

Los 4 primeros archivos son pertenecientes al software Labview encargado del almacenamiento y control del equipo, y el archivo final al software STEP 7 encargado de la adquisición de señales de temperatura.

- **Ingreso a la aplicación**

### Step 7

Desde la barra de tareas de Windows seleccione el comando Inicio, luego desde el grupo de programas seleccione el ítem Step 7 MicroWIN. Una vez hechas las selecciones se activa la aplicación. A continuación se presenta la pantalla de activación de la aplicación:

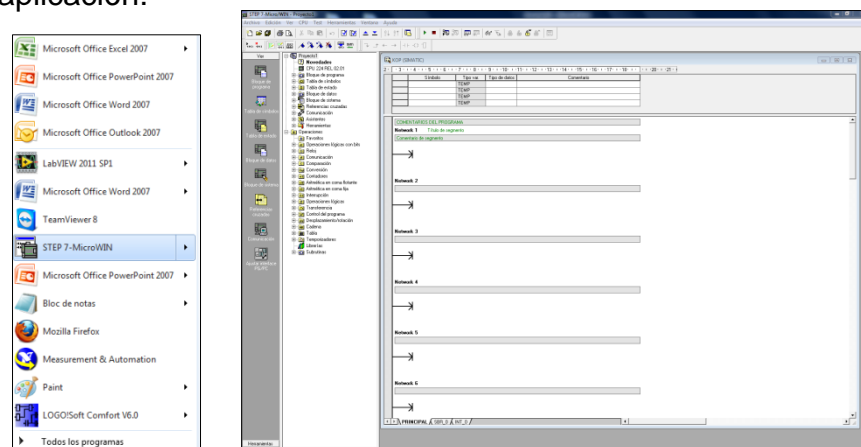


Figura 62 Paso 1 para ejecución del software de medición de conductividad

Nos disponemos a abrir la aplicación encargada de la adquisición de las señales de temperatura. Nos dirigimos a la opción archivo, abrir y seleccionamos el archivo **Thermocouple** ubicado en la carpeta suministrada.

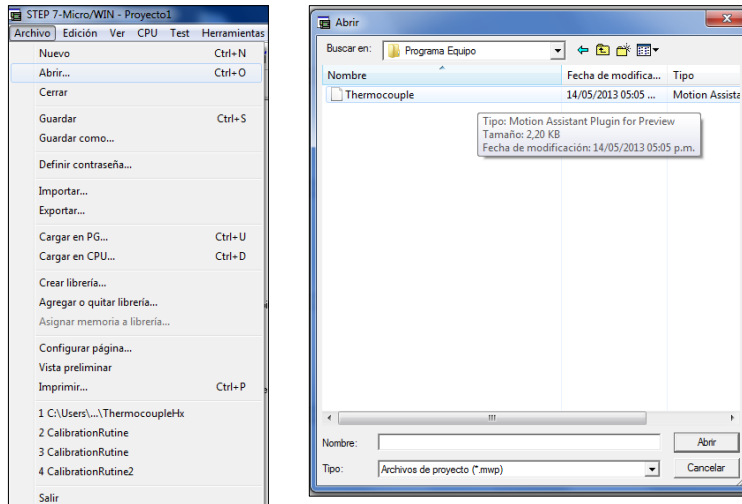


Figura 63 Paso 2, abrir archivo de medición de temperatura

Se debe visualizar de la siguiente forma:

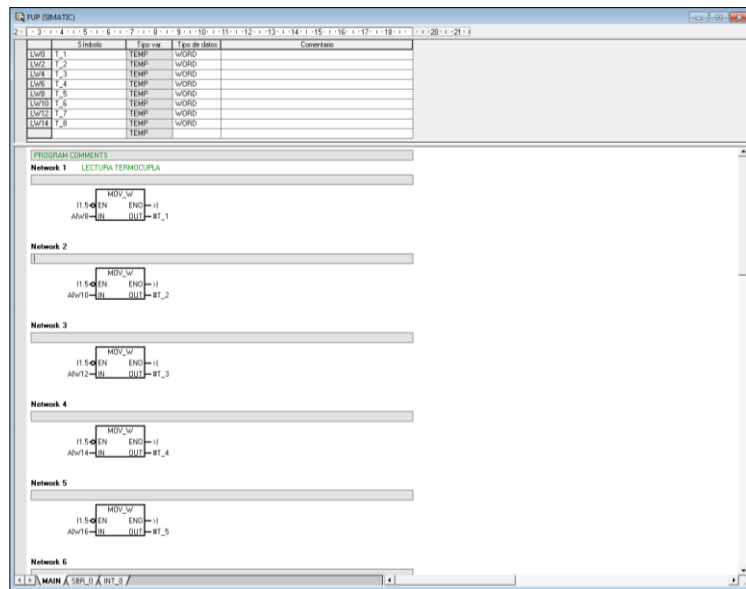


Figura 64 Escenario del programa step 7

Esta visualización permite identificar cada una de las variables del programa principal, las cuales hace referencia a las 8 señales de temperatura que se adquieren.



	Símbolo	Tipo var.	Tipo de datos	Comentario
LW0	T_1	TEMP	WORD	
LW2	T_2	TEMP	WORD	
LW4	T_3	TEMP	WORD	
LW6	T_4	TEMP	WORD	
LW8	T_5	TEMP	WORD	
LW10	T_6	TEMP	WORD	
LW12	T_7	TEMP	WORD	
LW14	T_8	TEMP	WORD	

Figura 65 Identificación de señales de temperatura

La totalidad del programa se muestra a continuación:

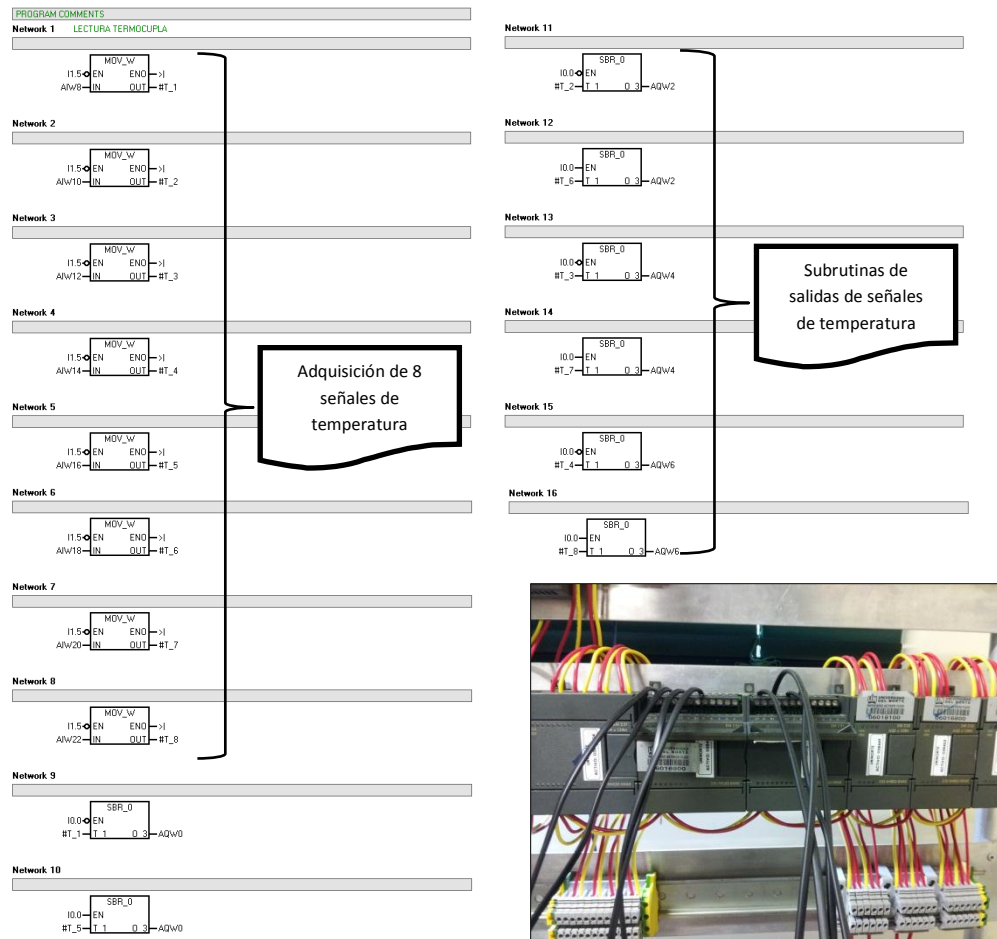
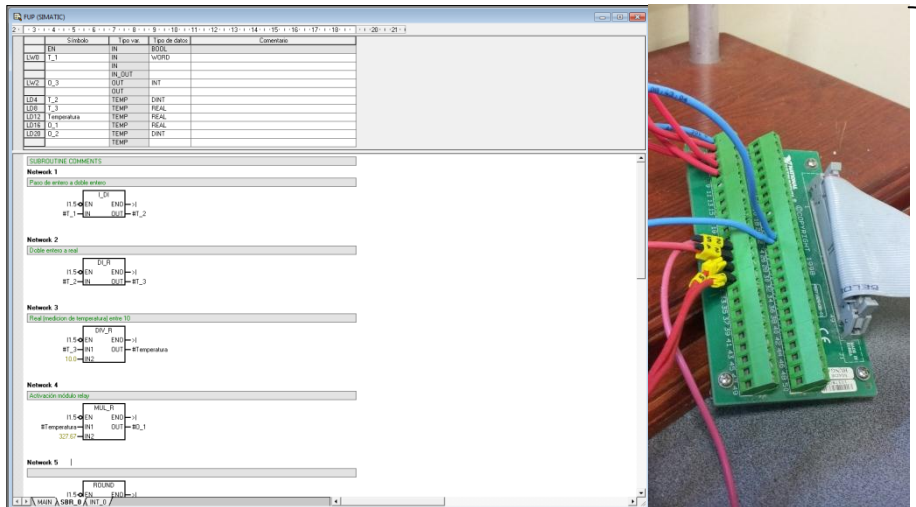


Figura 66 Programa de adquisición de señales de temperatura en Step 7

La subrutina mencionada una vez captada la señal de temperatura enviar una señal de corriente proporcionada desde un módulo de salida analógico (AQW0-4-6) a una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments la cual se encuentra conectada al ordenador.



Conexión de puerto serial

Figura 67 Conexión de puerto serial de tarjeta de adquisición de datos

La totalidad de la subrutina se muestra a continuación

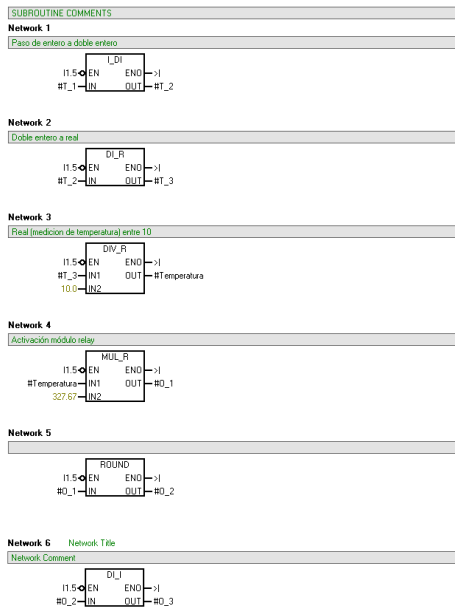


Figura 68 Subrutina completa de adquisición de señales de temperatura

### 1.1.1. Ejecución de programa Step 7

Se debe verificar que el PLC se encuentre en el modo RUN físicamente:



Figura 69 Verificación de estado del PLC

Se descarga la rutina al PLC:

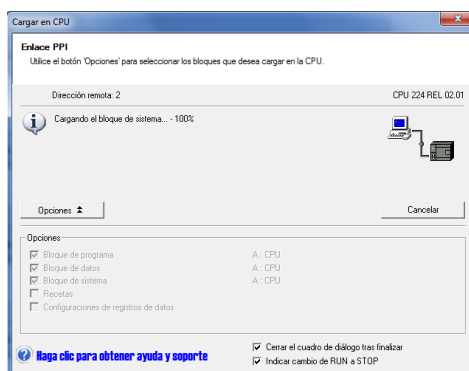
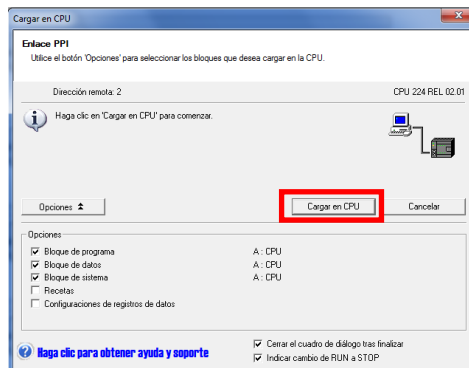
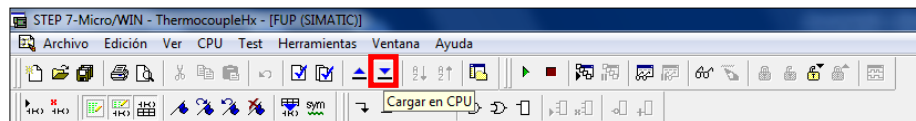


Figura 70 Secuencia de ejecución de programa en step 7

Se ejecuta la rutina:

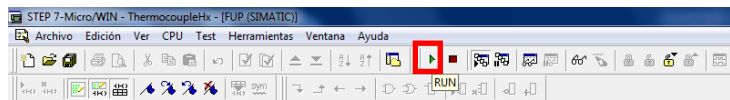


Figura 71 Botón ejecución de programa

Se visualiza la rutina en el ordenador

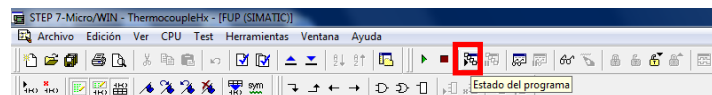


Figura 72 Visualización de la ejecución de programa

Cada uno de los operadores del programa principal se activan, lo cual es evidenciado por las líneas de color azul

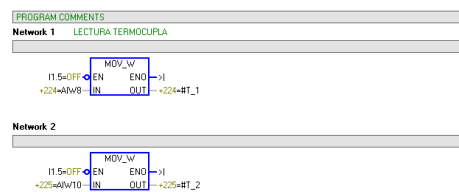


Figura 73 Activación de operadores

## 1.2. LABVIEW

Desde la barra de tareas de Windows seleccione el comando Inicio, luego desde el grupo de programas seleccione el ítem Labview 2011. Una vez hechas las selecciones se activa la aplicación.



Figura 74 Ejecución de labview

Se abre la aplicación encargada del almacenamiento de datos y control de proceso. Nos dirigimos a la opción File, Open y seleccionamos el archivo **DO2** ubicado en la carpeta suministrada.

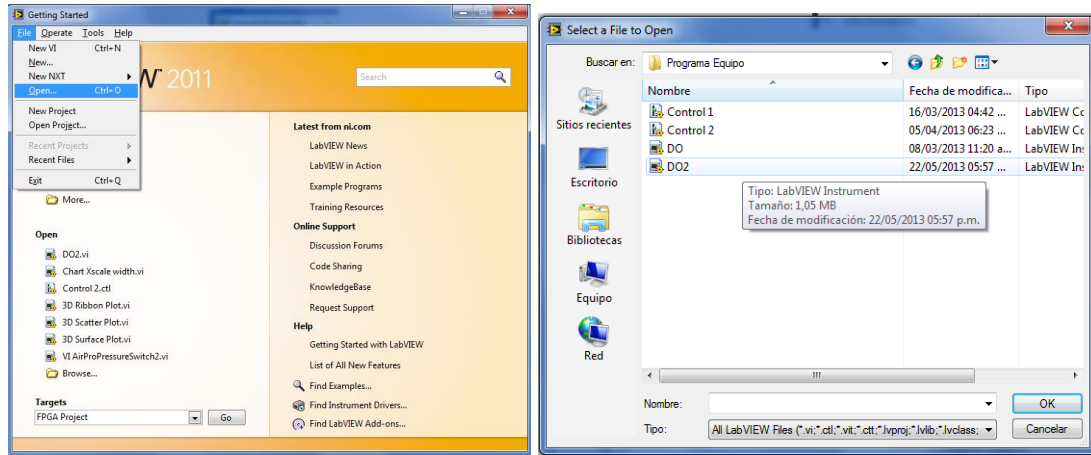


Figura 75 Ejecución de programa principal

Se debe visualizar de la siguiente forma:

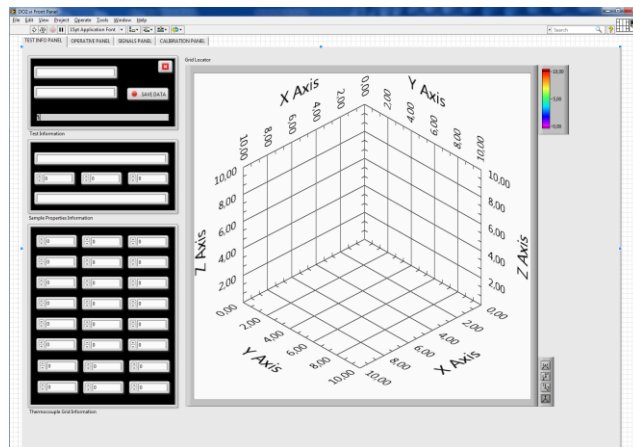


Figura 76 Ventana principal Programa Labview

### 1.2.1. Ejecución Labview

Se inicia la ejecución de la aplicación en RUN:

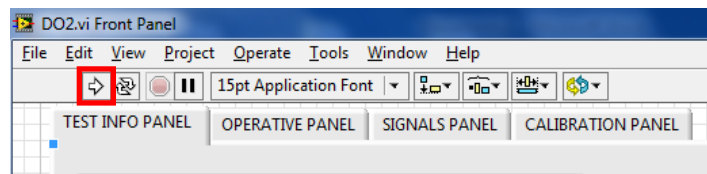


Figura 77 Ejecución de programa

La pantalla de visualización inicial es la siguiente:

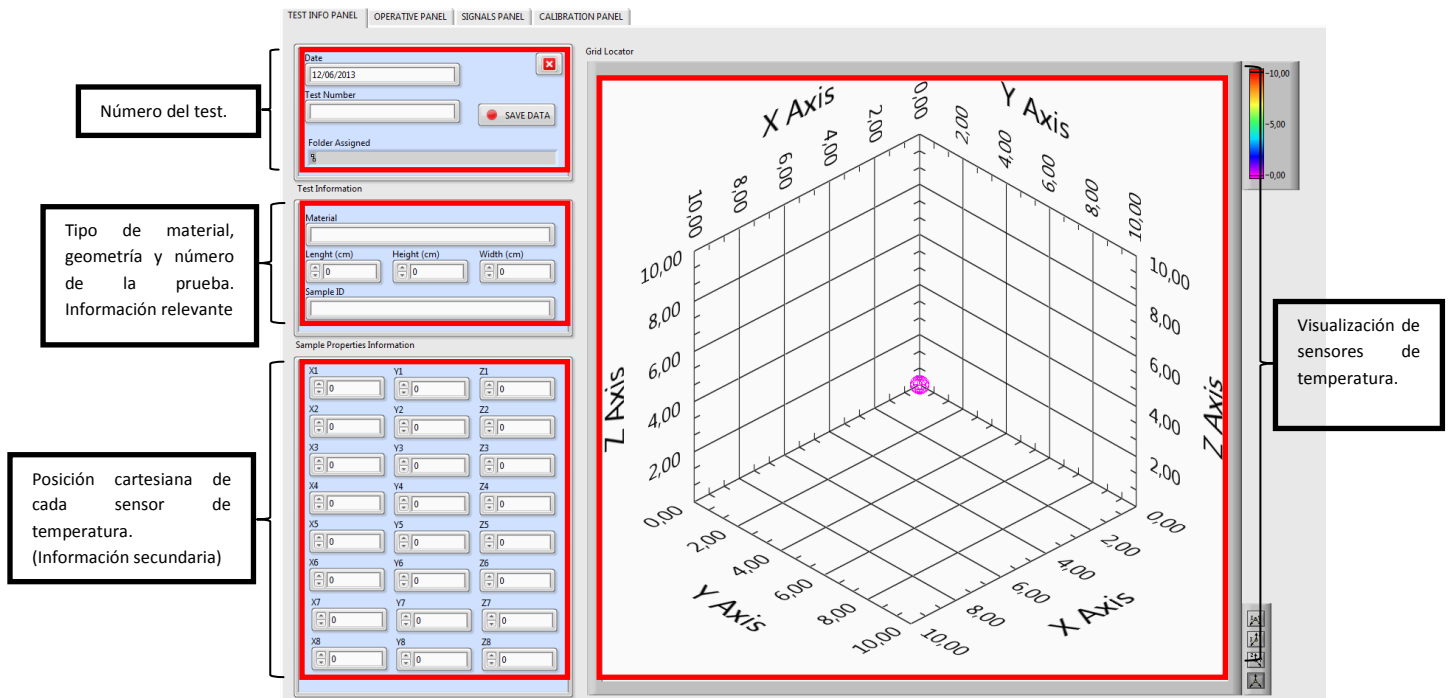


Figura 78 Partes de la ventana principal

Una vez se suministre la información mínima para la prueba se guardan los datos.

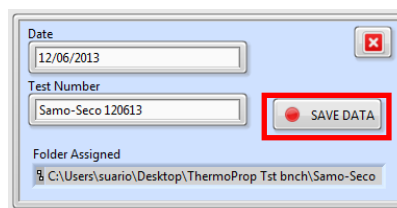


Figura 79 Botón para guardar datos

Nos posicionamos en la ventana de panel de operación:

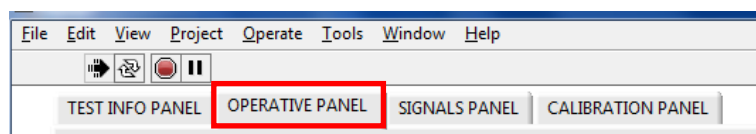


Figura 80 Botón para habilitar el panel operativo

Debe visualizarse el panel de la siguiente forma:

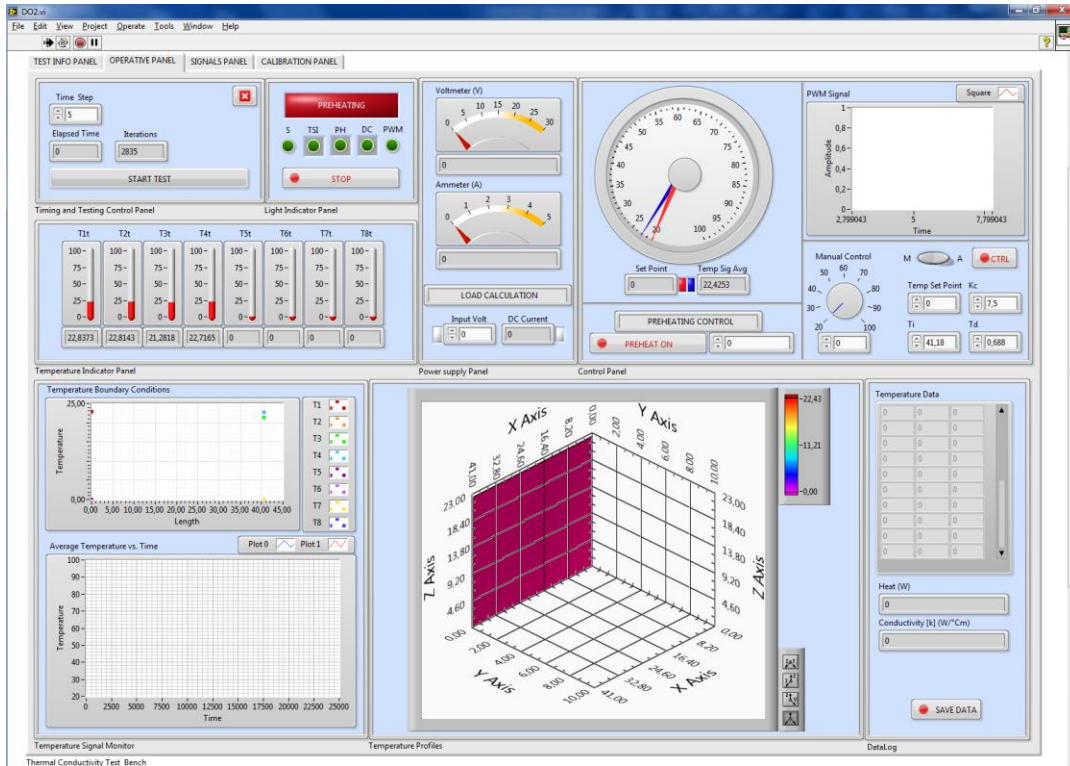


Figura 81 Panel operativo de labview

Cada una de las sub-ventanas cumple las siguientes funciones:

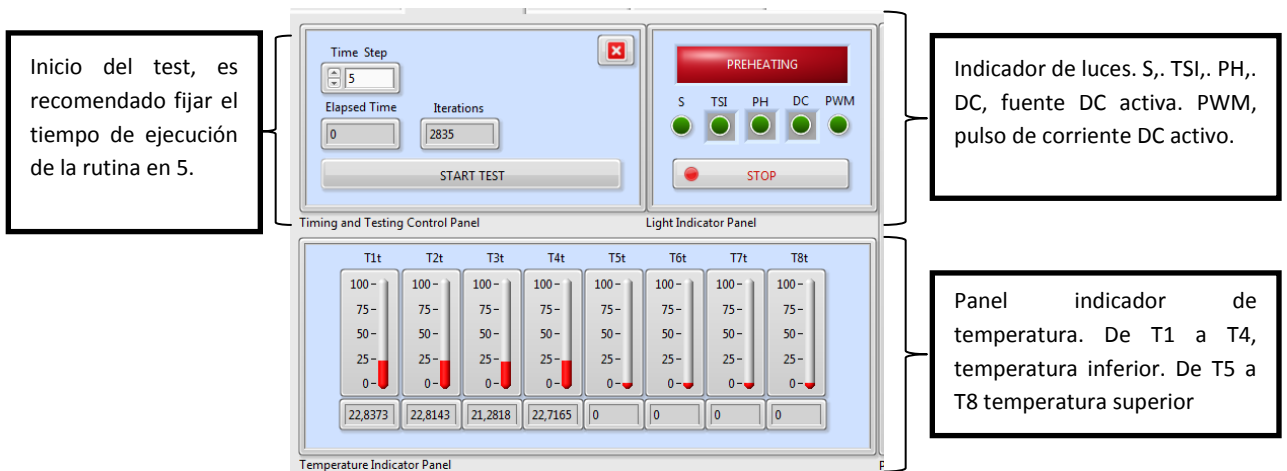
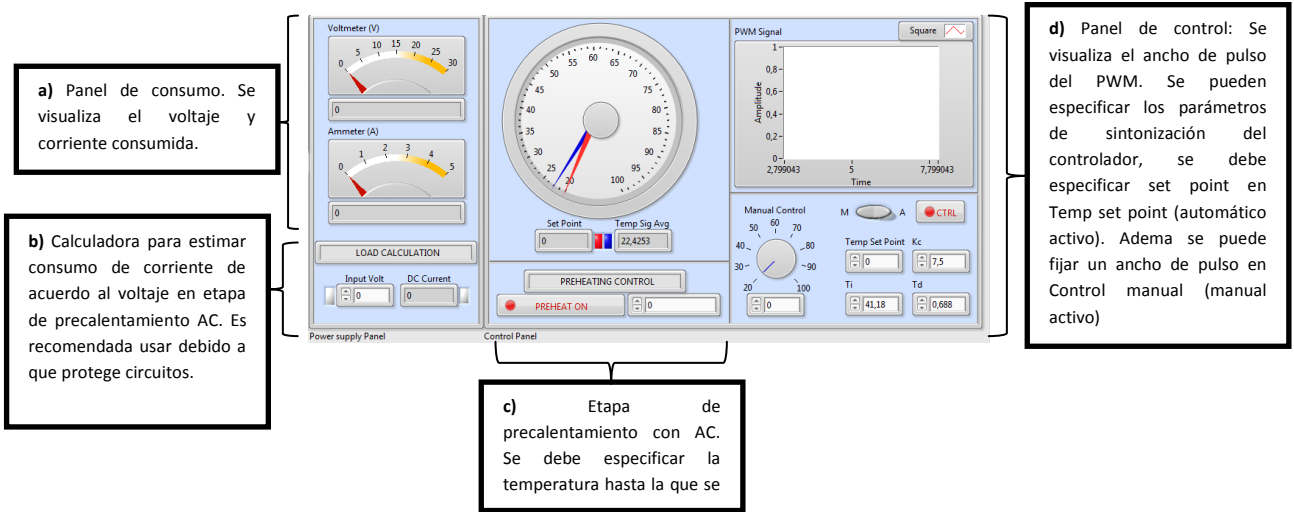
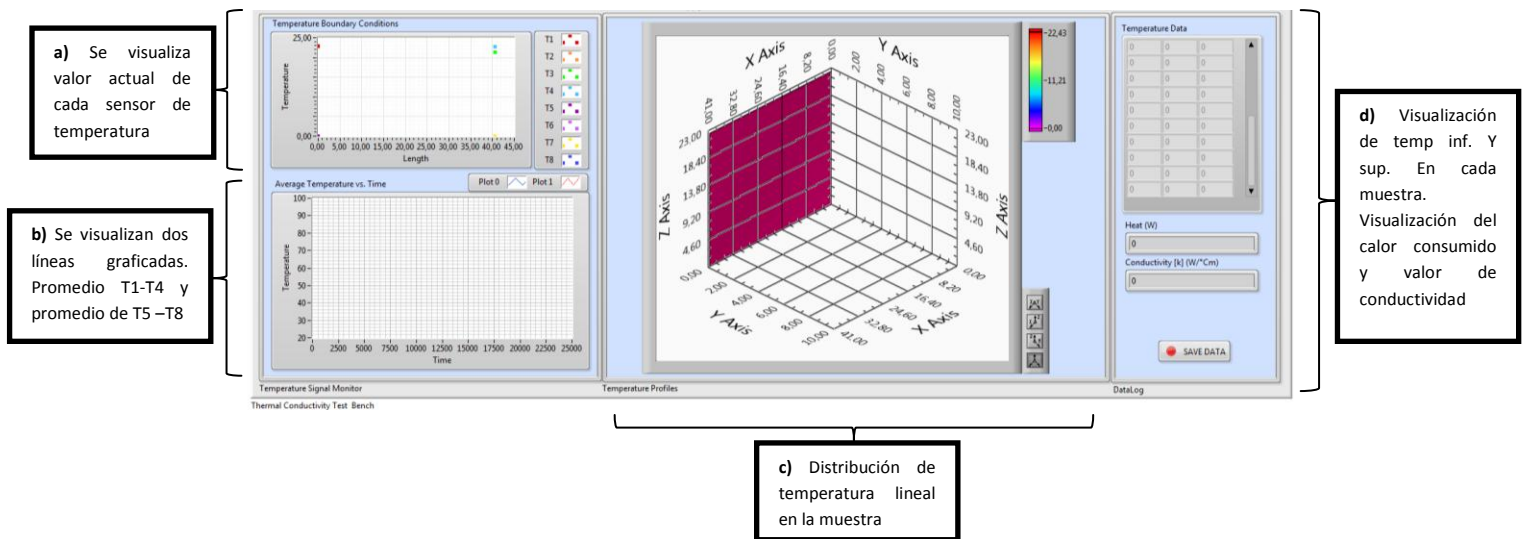


Figura 82 Visualizador de temperaturas y de estados de funcionamiento del panel



**Figura 83 a) Visualizador de voltaje y corriente, b) Calculadora de corriente requerida, c) Habilitar etapa de calentamiento, d) Panel de control**



**Figura 84 a) Condición de temperaturas, b) Temperaturas inferior y superior, c) Distribución de temperatura, d) Visualizados analógico de temperaturas promediadas y de propiedad medida**

Antes de comenzar la toma de datos deben ser ubicados los sensores de temperatura en la muestra analizada de la siguiente forma:



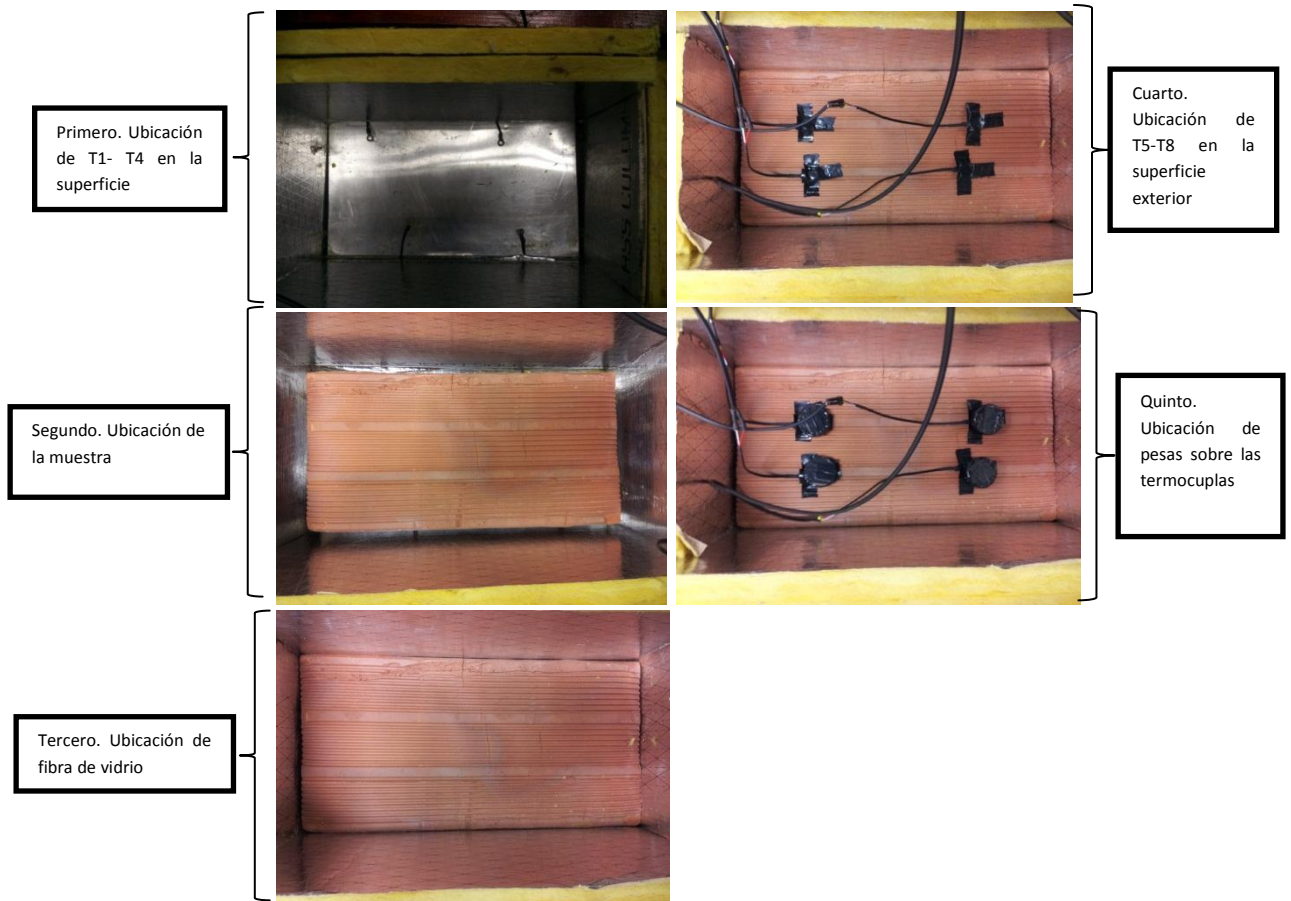


Figura 85 Pasos para ubicación de la muestra en equipo de medición de conductividad térmica

Debido a que inicialmente la muestra se precalienta, se debe activar la parte AC del circuito. El Dial debe ser ubicado de tal forma que alimente el circuito principal con 40 V RMS (marca física)

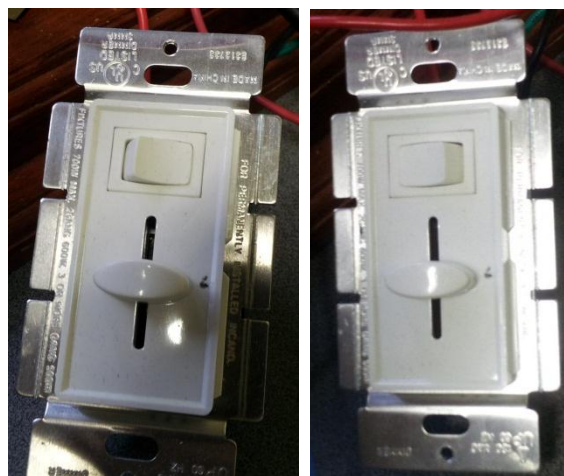


Figura 86 Interruptor de pre-calentamiento

Para iniciar la toma de datos se activa la rutina en Star test:

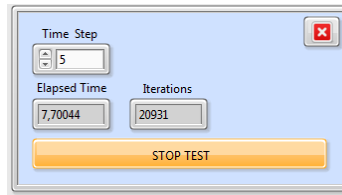


Figura 87 Botón de inicio de programa Labview

Una vez activada la rutina inicia el almacenamiento de datos de los sensores de temperatura, lo cual se ve reflejado en el panel gráfico. El usuario debe esperar que las dos temperaturas promedio se estabilicen.

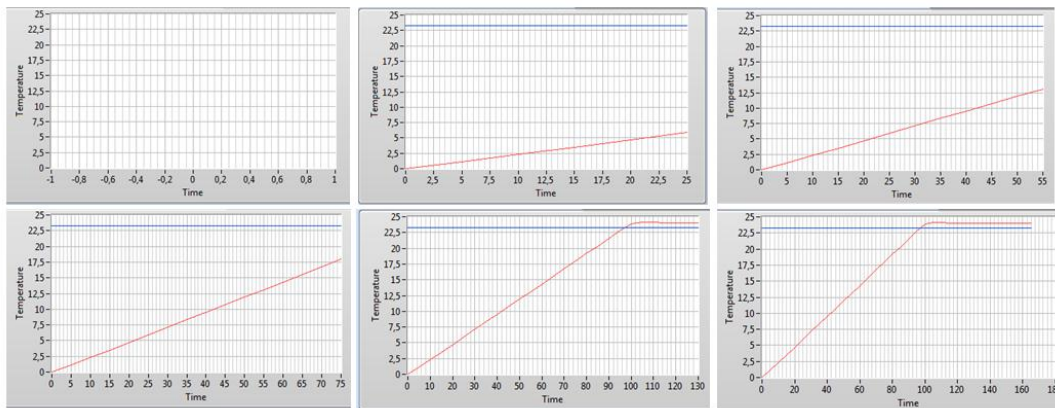


Figura 88 Estabilización de temperaturas al inicio de la prueba

Una vez se estabilicen las temperaturas presionar Stop test y Start test. De esta forma las temperaturas se encontraran estabilizadas y la grafica se reiniciará.

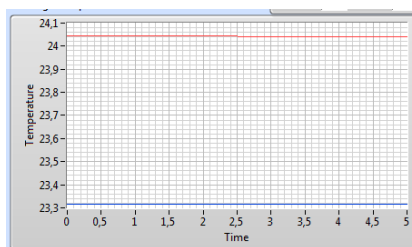


Figura 89 Visualización de estabilización de temperatura

Se inicia la etapa de precalentamiento con AC, debe ser presionado el botón PREHEAT ON; debe ser especificada la temperatura de precalentamiento en

grados centígrados, una vez alcanza dicha temperatura se desactiva el pre-calentamiento.

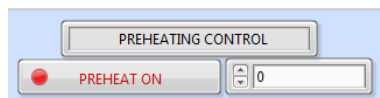


Figura 90 Inicio del pre-calentamiento

En el panel grafico se visualiza el aumento de la temperatura:

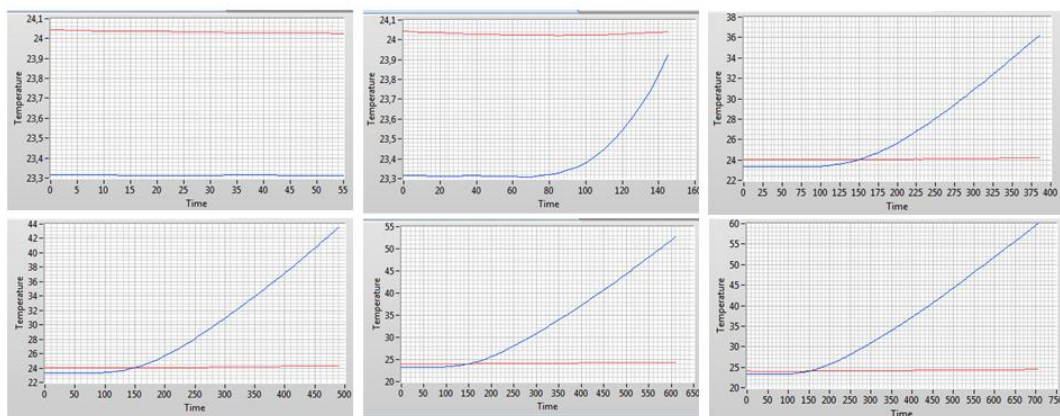


Figura 91 Etapa de pre-calentamiento del equipo de conductividad térmica

Una vez es alcanzada la temperatura de precalentamiento se activa manualmente el controlador:

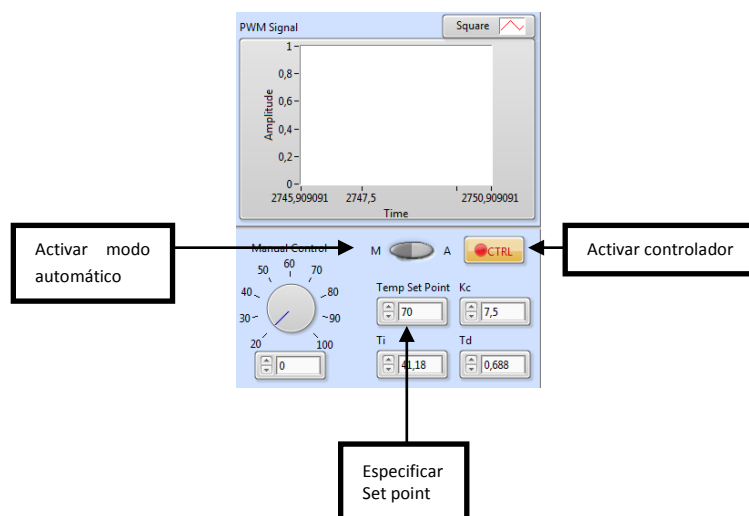


Figura 92 Panel de control del software para medición de conductividad térmica

En esta etapa la fuente DC debe encontrarse encendida y configurada en 30 V

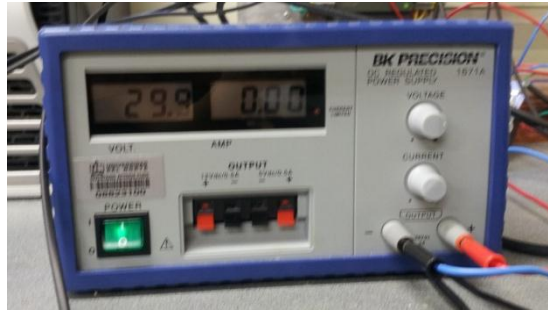


Figura 93 Fuente para suministro de potencia a la resistencia térmica

Si la configuración del sistema es correcta el PWM debe iniciar su funcionamiento.

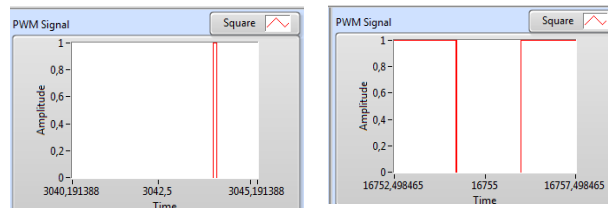


Figura 94 Funcionamiento del PWM

Gráficamente se visualiza el control de la temperatura inferior. Para dar por terminada la prueba las dos temperaturas promedio deben estabilizar.

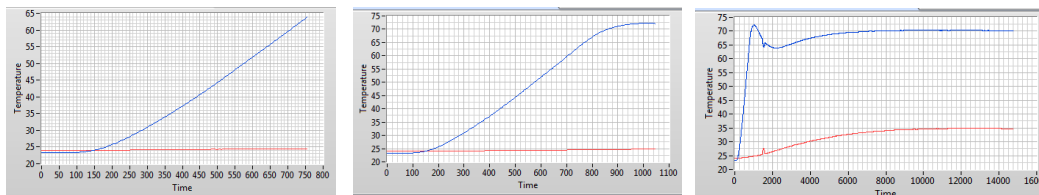


Figura 95 Estabilización de temperaturas monitoreadas

Se puede visualizar el valor de la potencia disipada y de la conductividad térmica en el tiempo. En el botón *save data* se guardan los resultados obtenidos en el tiempo.

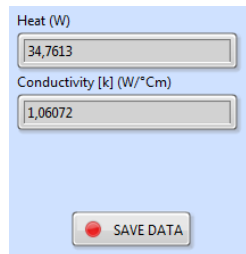


Figura 96 Guardar datos obtenidos en prueba

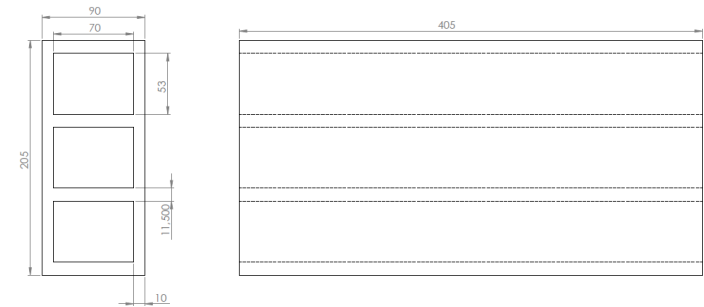
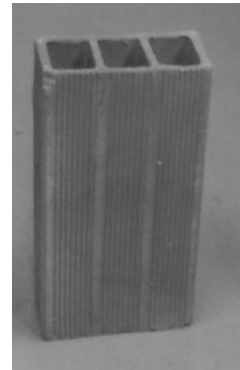
## **ANEXO B-Pruebas de conductividad térmica**

### **1. Pruebas de conductividad térmica**

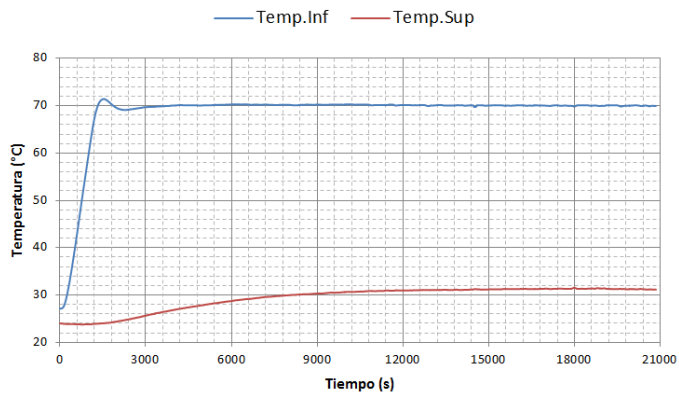
Los datos de conductividad presentados a continuación deben ser corregidos por las correlaciones presentadas en el documento, debido a que estas son las gráficas originales dadas por el software.

**MATERIAL: LADRILLO #3**

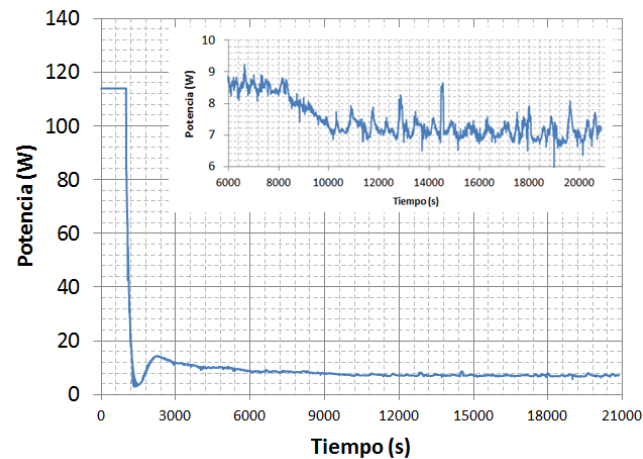
DIMENSIONES: 0.40X0.20X0.09 m  
VOLUMEN APARENTE: 7200 cm<sup>3</sup>  
MASA: 5134 gr  
DENSIDAD APARENTE: 0.713 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 64.175 Kg/m<sup>3</sup>  
MASA DE AGUA: 7 gr  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.208 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.4327 m<sup>2</sup> °C/W  
PRECIO: 960



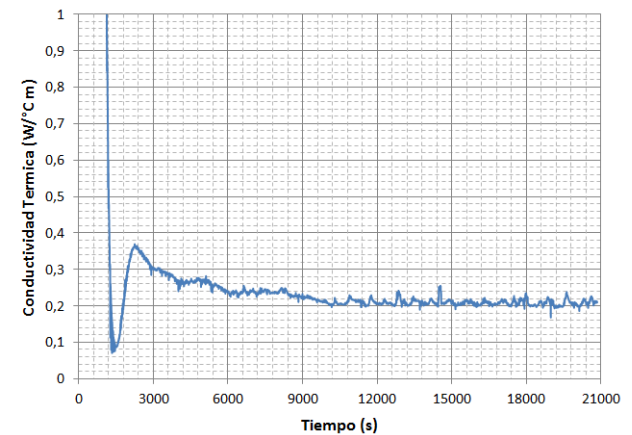
**Figura 97 Plano del ladrillo #3**



**Figura 98 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del ladrillo #3**



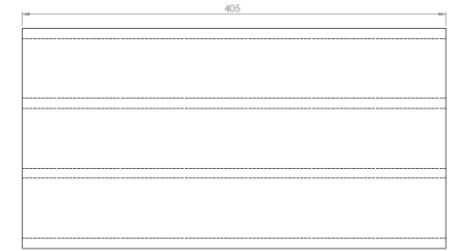
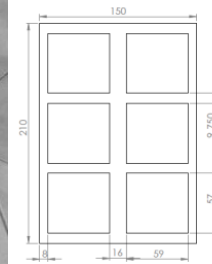
**Figura 99 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del ladrillo #3**



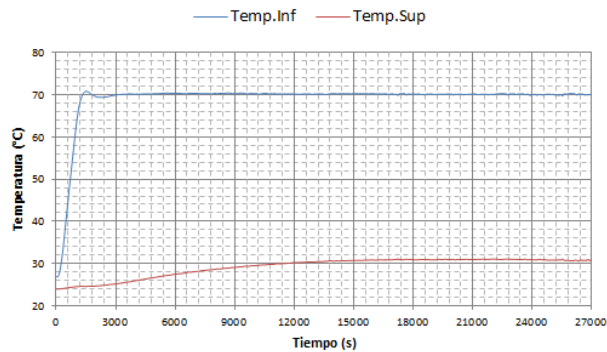
**Figura 100 Conductividad térmica del ladrillo #3**

**MATERIAL: LADRILLO #6**

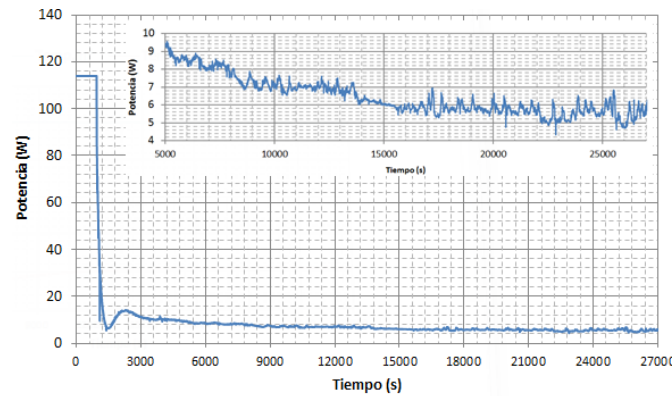
DIMENSIONES: 0.40X0.20X0.15 m  
VOLUMEN APARENTE: 12000 cm<sup>3</sup>  
MASA: 8396 gr  
DENSIDAD APARENTE: 0.699 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 104.95Kg/m<sup>2</sup>  
MASA DE AGUA:93 gr  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.245W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.6123 m<sup>2</sup> °C/ W  
PRECIO: 1585



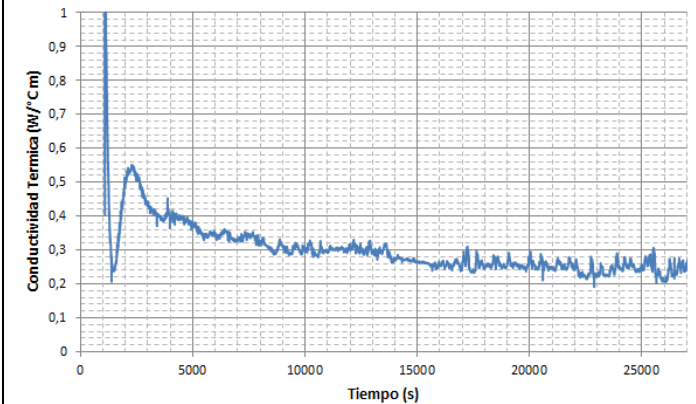
**Figura 101 Plano del Ladrillo #6**



**Figura 102 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del ladrillo #6**



**Figura 103 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del ladrillo #6**



**Figura 104 Conductividad térmica del ladrillo #6**

**MATERIAL: BLOQUE DE LADRILLO COMUN**

DIMENSIONES: 0.17x0.08x0.04 m  
VOLUMEN: 1728cm<sup>3</sup>  
MASA: 840 gr  
DENSIDAD APARENTE: 0.486 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 58.3 Kg/m<sup>2</sup>  
MASA DE AGUA: 9 gr  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 1.263 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.063 m<sup>2</sup> °C/W  
PRECIO: 160



Figura 105 Plano del ladrillo común

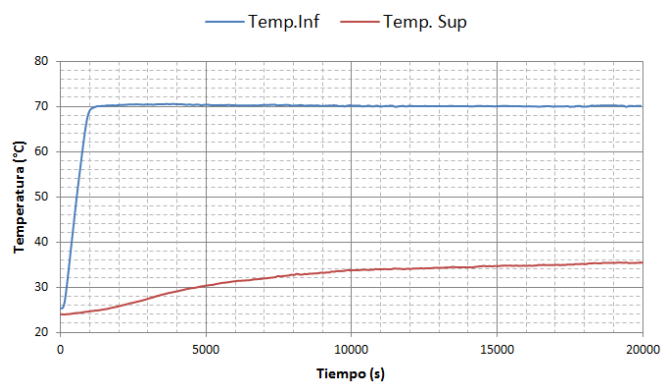


Figura 106 Temperaturas promedio de superficie en prueba de conductividad térmica del ladrillo común

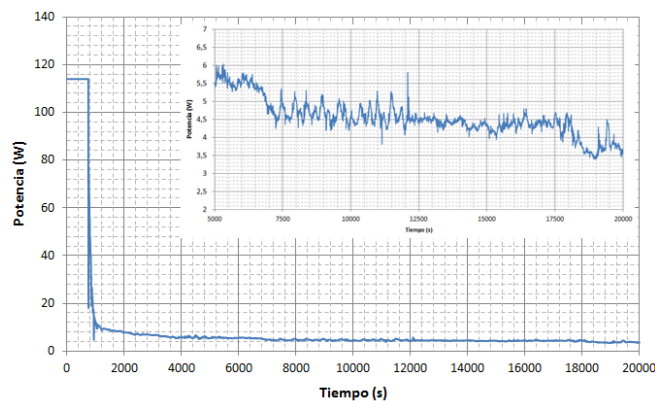


Figura 107 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del ladrillo común

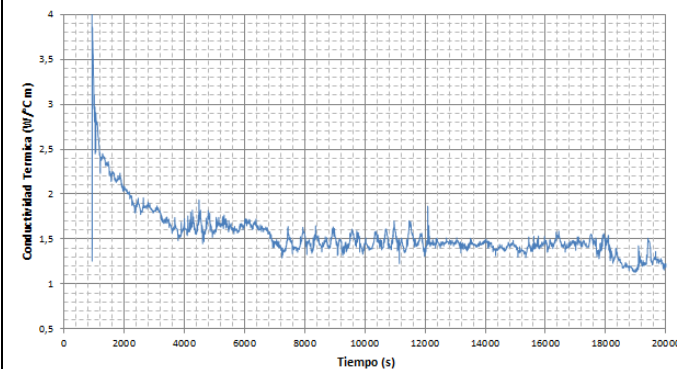


Figura 108 Conductividad térmica del ladrillo común



**MATERIAL: TOLETE MACIZO #3**

DIMENSIONES: 0.20 X0.10X0.03 m  
VOLUMEN APARENTE:600 cm<sup>3</sup>  
MASA: 1245.1 gr  
DENSIDAD APARENTE : 2.075 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 207.516 Kg/m<sup>2</sup>  
MASA DE AGUA: 2.2 gr  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.371 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA:0.086 m<sup>2</sup> °C/ W  
PRECIO: 350



Figura 109 Plano tolete macizo #3

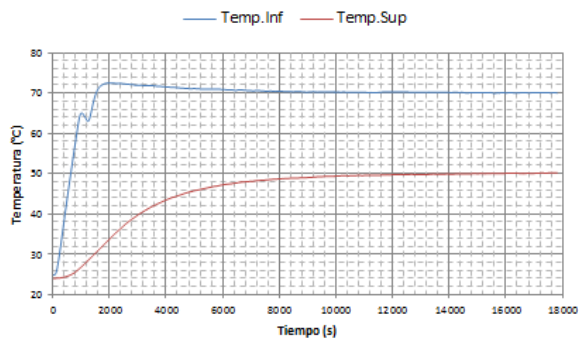


Figura 110 Temperaturas promedio de superficie en prueba de conductividad térmica del tolete macizo #3

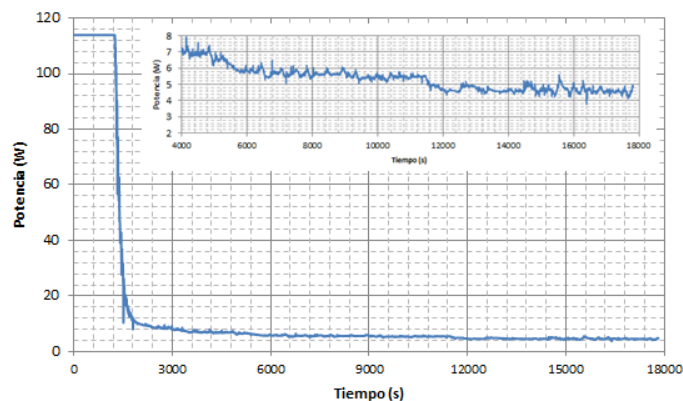


Figura 111 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del tolete macizo #3

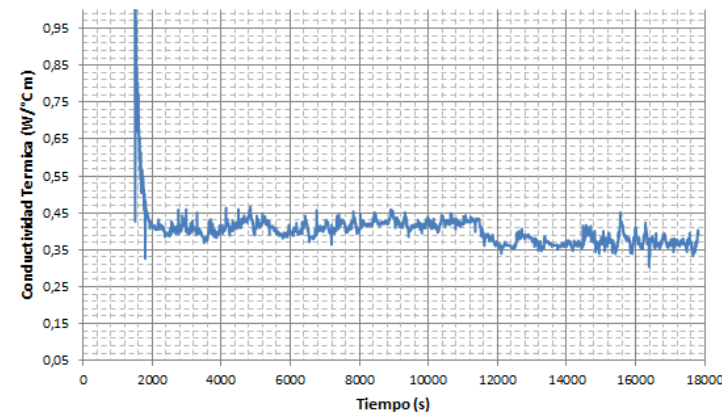
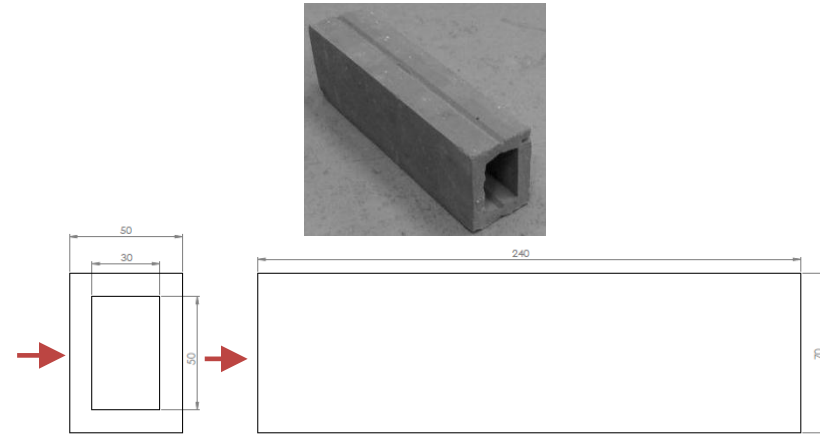


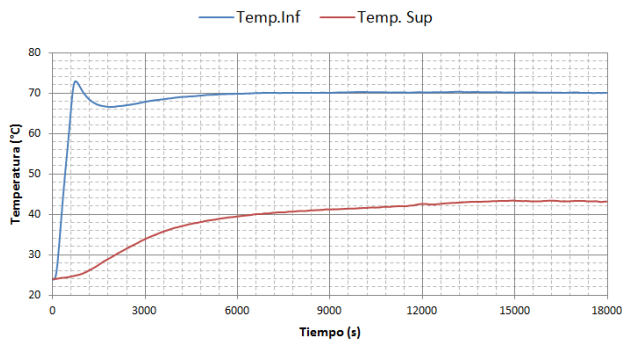
Figura 112 Conductividad térmica del tolete macizo #3

**MATERIAL: BOCADILLO DE ENCHAPE**

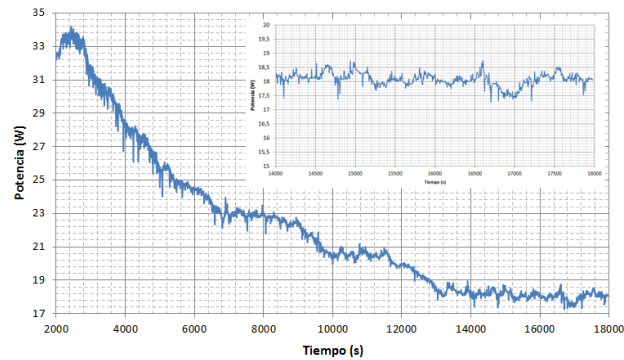
DIMENSIONES: 0.24 x 0.07 x 0.05 m (0.24x0.07)  
VOLUMEN APARENTE: 840 cm<sup>3</sup>  
MASA: 1037 gr  
DENSIDAD APARENTE: 1.234 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 61.726 Kg/m<sup>2</sup>  
MASA DE AGUA: 6 gr  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 2.474 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.0234 m<sup>2</sup> °C / W  
PRECIO: 550



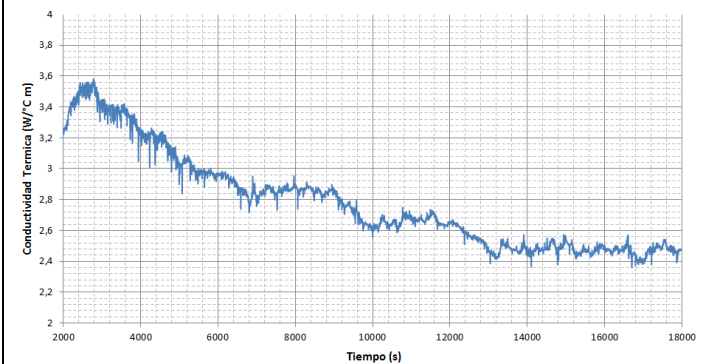
**Figura 113 Plano del bocado de enchape**



**Figura 114 Temperaturas promedio de superficie en prueba de conductividad térmica del bocado de enchape, configuración 1**



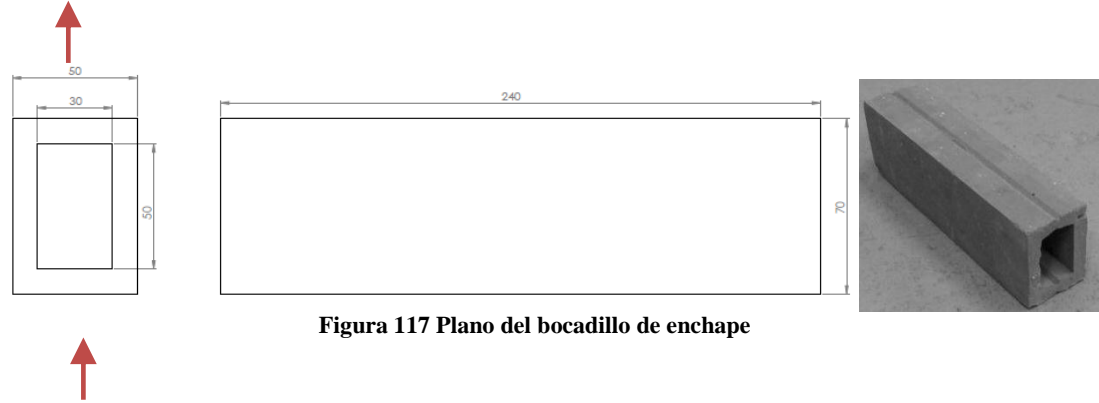
**Figura 115 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bocado de enchape, configuración 1**



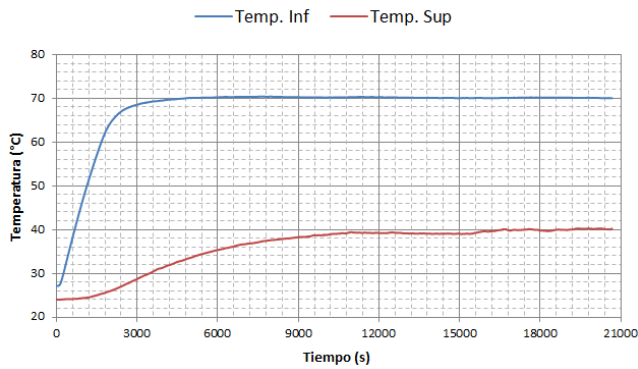
**Figura 116 Conductividad térmica del bocado de enchape, configuración 1**

**MATERIAL: BOCADILLO DE ENCHAPE**

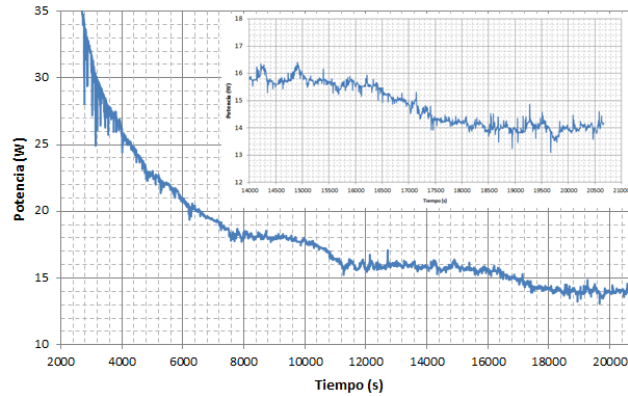
DIMENSIONES: 0.24 x 0.07 x 0.05 m (24x5)  
VOLUMEN APARENTE: 840 cm<sup>3</sup>  
MASA: 1037 gr  
DENSIDAD APARENTE: 1.234 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 86.417 Kg/m<sup>2</sup>  
MASA DE AGUA: 6 gr  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 2.515 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.0278 m<sup>2</sup> °C/W  
PRECIO: 550



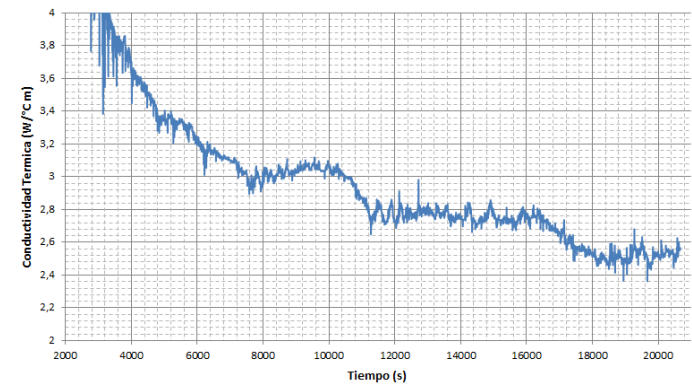
**Figura 117 Plano del bocado de enchape**



**Figura 118 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bocado de enchape, configuración 2**



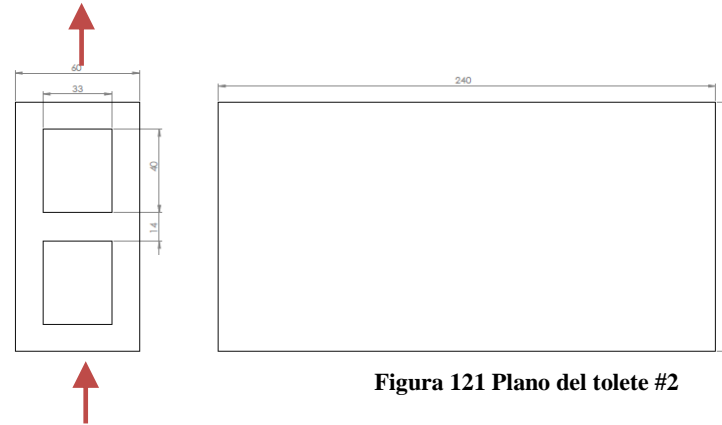
**Figura 119 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bocado de enchape, configuración 2**



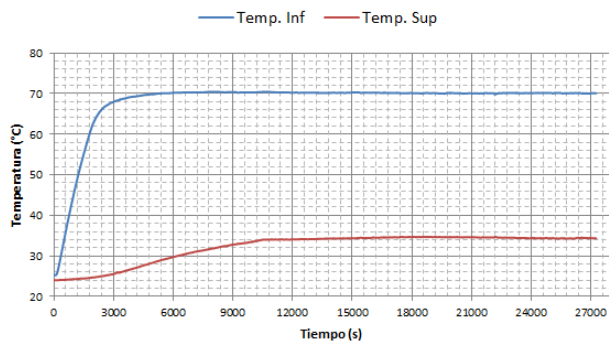
**Figura 120 Conductividad térmica del bocado de enchape, configuración 2**

**MATERIAL: TOLETE#2 2 HUECOS**

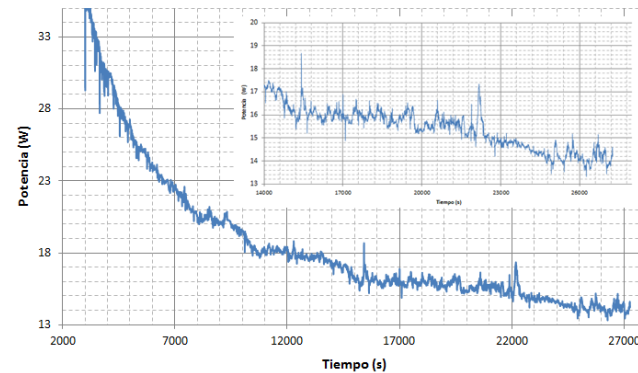
DIMENSIONES: 0.24 x 0.12 x 0.06 m (24x6)  
VOLUMEN APARENTE: 1728 cm<sup>3</sup>  
MASA: 1970 gr  
DENSIDAD APARENTE: 1.140 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 136.805 Kg/m<sup>2</sup>  
MASA DE AGUA: 12.1 gr  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 3.332 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.036 m<sup>2</sup> °C / W  
PRECIO: 720



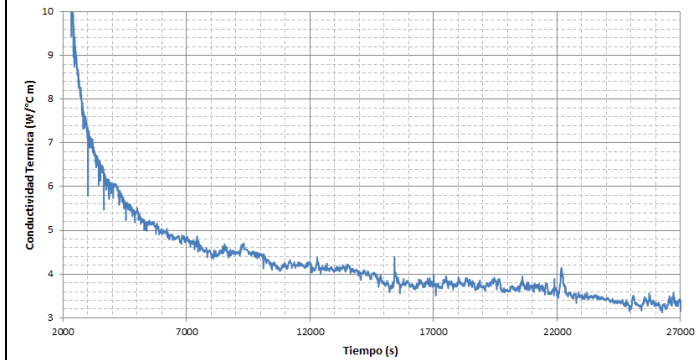
**Figura 121 Plano del tolete #2**



**Figura 122 Temperaturas promedio de superficie en prueba de conductividad térmica del tolete #2 , configuración 1**



**Figura 123 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del tolete #2 , configuración 1**



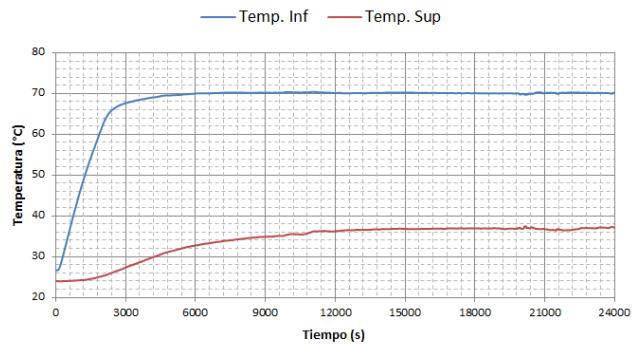
**Figura 124 Conductividad térmica del tolete #2, configuración 1**

**MATERIAL: TOLETE#2 2 HUECOS**

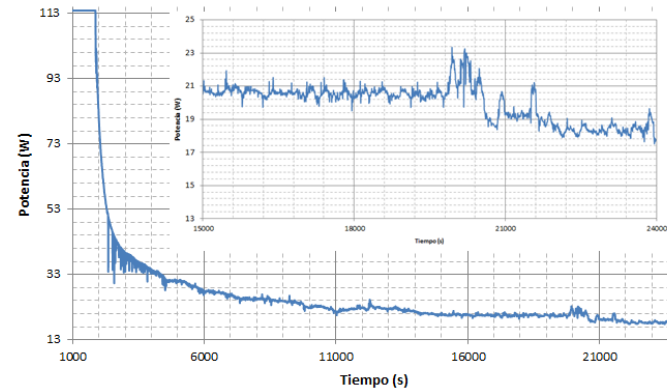
DIMENSIONES: 0.24 x 0.12 x 0.06 m (0.24x0.12)  
VOLUMEN APARENTE: 1728 cm<sup>3</sup>  
MASA: 1970 gr  
DENSIDAD APARENTE: 1.140 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 68.402 Kg/m<sup>3</sup>  
MASA DE AGUA: 12.1 gr  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 1.322 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.045 m<sup>2</sup> °C / W  
PRECIO: 720



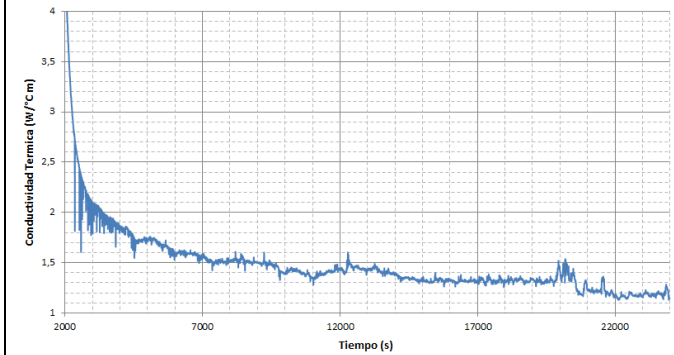
**Figura 125 Plano de tolete #2**



**Figura 126 Temperaturas promedio de superficie en prueba de conductividad térmica del tolete #2 , configuración 2**



**Figura 127 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del tolete #2 , configuración 2**



**Figura 128 Conductividad térmica del tolete #2**

**MATERIAL: Prensado liviano**

DIMENSIONES: 0.24.5X0.12X0.06 m  
VOLUMEN APARENTE: 1764 cm<sup>3</sup>  
MASA: 2661.5 gr  
DENSIDAD APARENTE: 1.508 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 90.527 Kg/m<sup>2</sup>  
MASA DE AGUA: 2.8 gr  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.844 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.142 m<sup>2</sup> °C/W  
PRECIO: 900

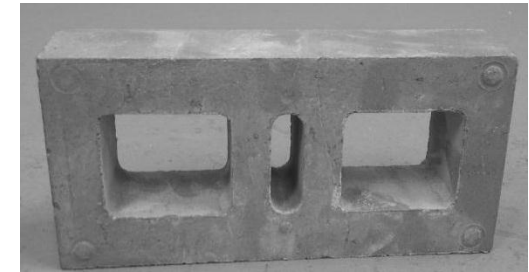
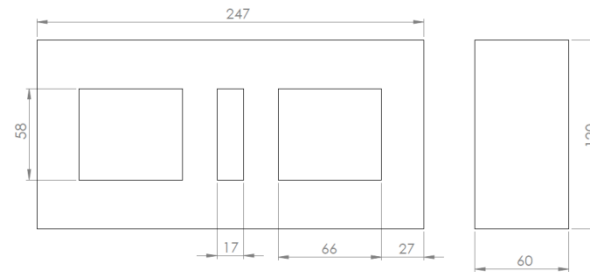


Figura 129 Plano del prensado liviano

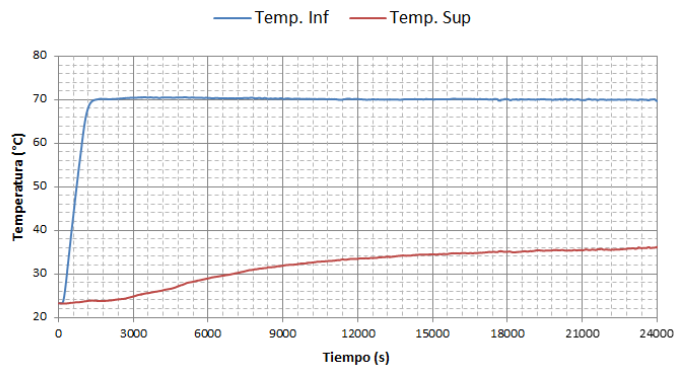


Figura 130 Temperaturas promedio de superficie en prueba de conductividad térmica del prensado liviano

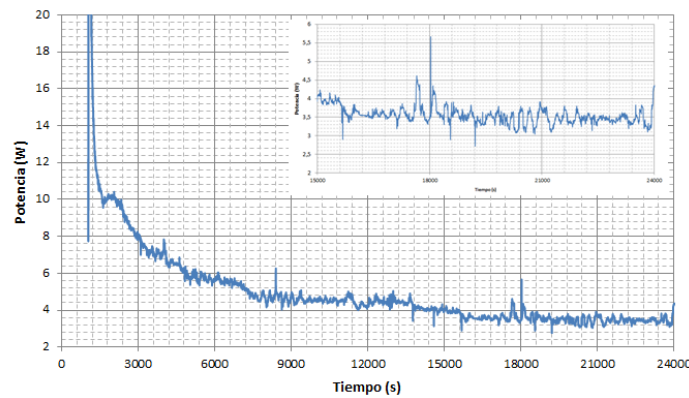


Figura 131 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del prensado liviano

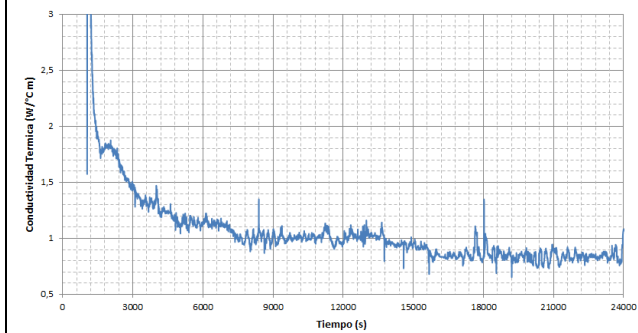
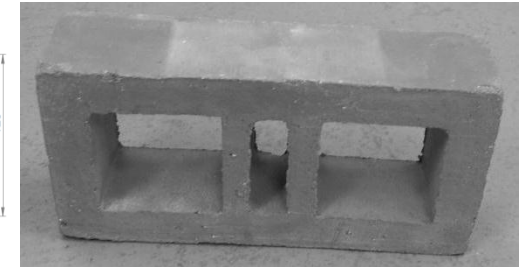
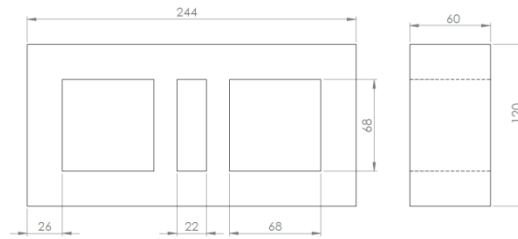


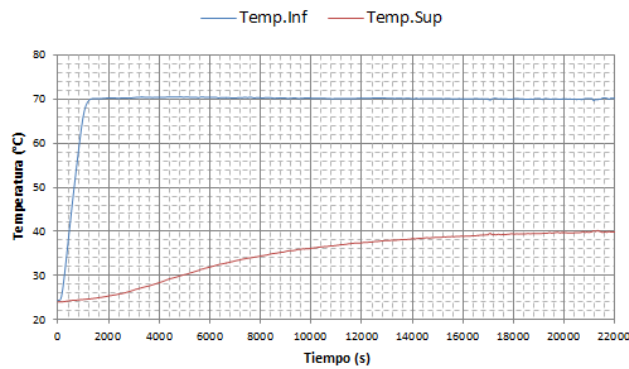
Figura 132 Conductividad térmica del prensado liviano

**MATERIAL: TOLETE #3 ESTRUCTURAL**

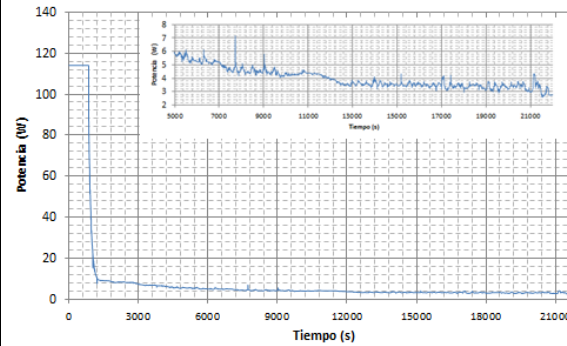
DIMENSIONES: 0.24 X0.12X0.06 m  
VOLUMEN APARENTE: 1728 cm<sup>3</sup>  
MASA: 2112 gr  
DENSIDAD APARENTE: 1.222 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 73.368 Kg/m<sup>2</sup>  
MASA DE AGUA: 1.1 gr  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.914 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.131 m<sup>2</sup> °C / W  
PRECIO: 740



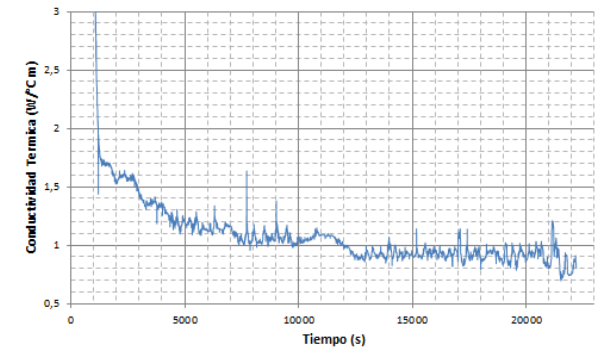
**Figura 133 Plano de tolete #3**



**Figura 134 Temperaturas promedio de superficie en prueba de conductividad térmica del tolete #3**



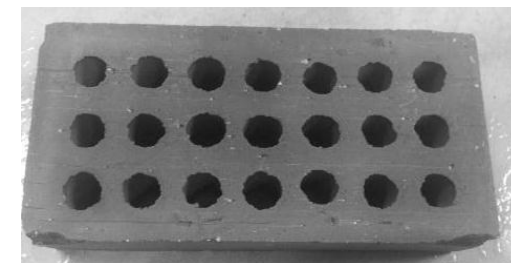
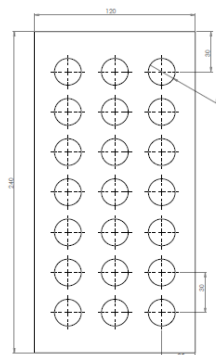
**Figura 135 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del tolete #3**



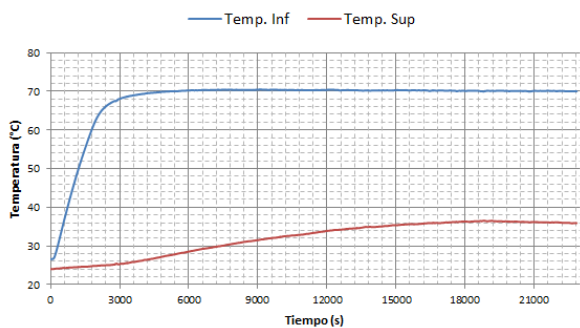
**Figura 136 Conductividad térmica del tolete #3**

**MATERIAL: TOLETE #1 PERFORADO**

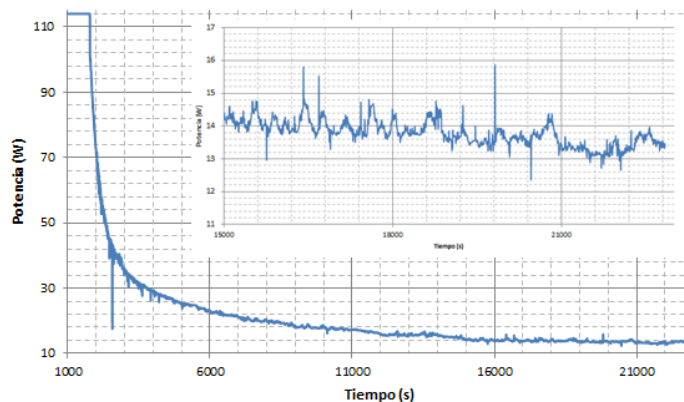
DIMENSIONES: 0.24X0.12X0.06 m  
 VOLUMEN: 1728 cm<sup>3</sup>  
 MASA: 2589.5 gr  
 DENSIDAD: 1.498 gr/cm<sup>3</sup>  
 DENSIDAD: 89.913 Kg/m<sup>2</sup>  
 MASA DE AGUA: 8.3 gr  
 CONDUCTIVIDAD TERMICA: 3.444 W/m °C  
 RESISTENCIA TERMICA: 0.0348 m<sup>2</sup> °C/W  
 PRECIO:745



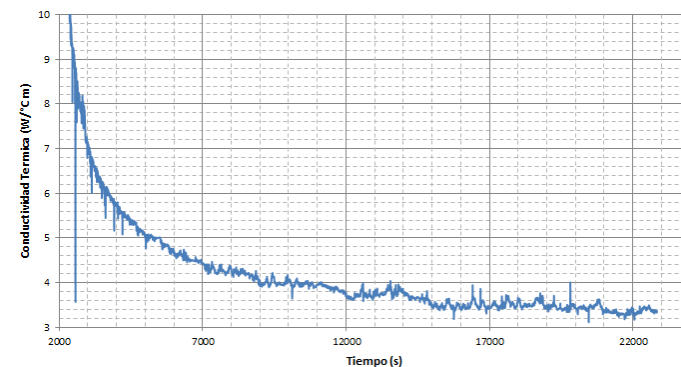
**Figura 137 Plano del tolete #1**



**Figura 138 Temperaturas promedio de superficie en prueba de conductividad térmica del tolete #1**



**Figura 139 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del tolete #1**



**Figura 140 Conductividad térmica del tolete #1**



**MATERIAL: BLOQUE DE CEMENTO**

DIMENSIONES: 0.35X0.15X0.09 m  
VOLUMEN APARENTE: 4725 cm<sup>3</sup>  
MASA:5444 gr  
DENSIDAD APARENTE:1.152 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD:103.7 Kg/m<sup>2</sup>  
MASA DE AGUA:74 gr  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.487 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.3183 m<sup>2</sup> °C/W  
PRECIO:680

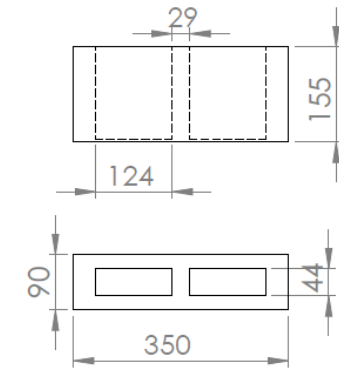


Figura 141 Plano de bloque de cemento

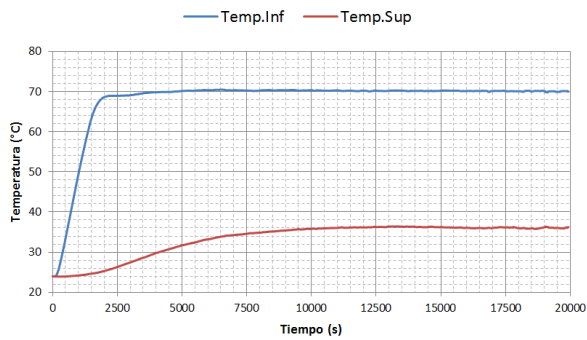


Figura 142 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque de cemento

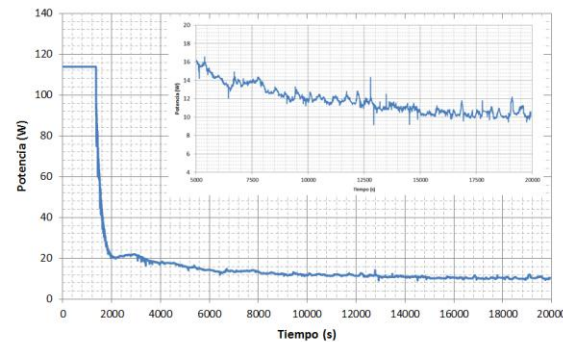


Figura 143 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque de cemento

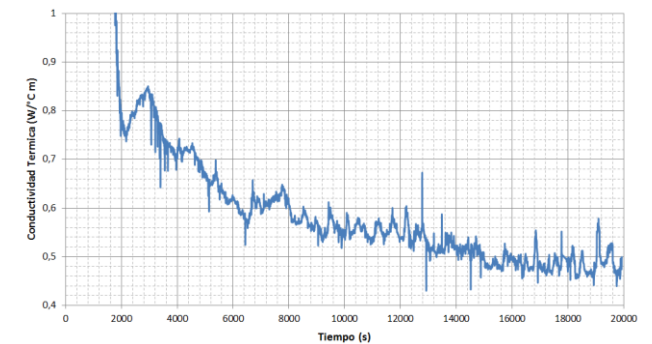
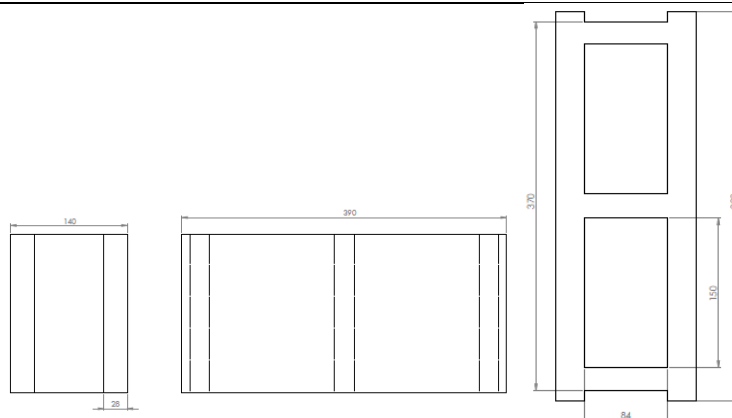


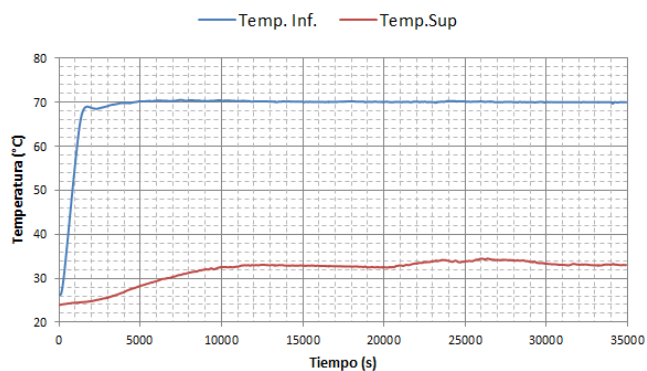
Figura 144 Conductividad térmica del bloque de cemento

**MATERIAL: BLOQUE DE CEMENTO PENSADO**

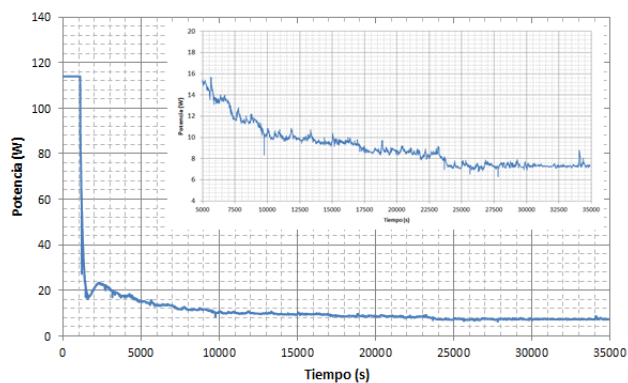
DIMENSIONES: 0.40X0.20X0.15 m  
 VOLUMEN APARENTE: 12000 cm<sup>3</sup>  
 MASA: 10983 gr  
 DENSIDAD APARENTE: 0.915 gr/cm<sup>3</sup>  
 DENSIDAD: 137.28 Kg/m<sup>3</sup>  
 MASA DE AGUA: 192 gr  
 CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.372 W/m °C  
 RESISTENCIA TERMICA: 0.3844 m<sup>2</sup> °C / W  
 PRECIO: 1400



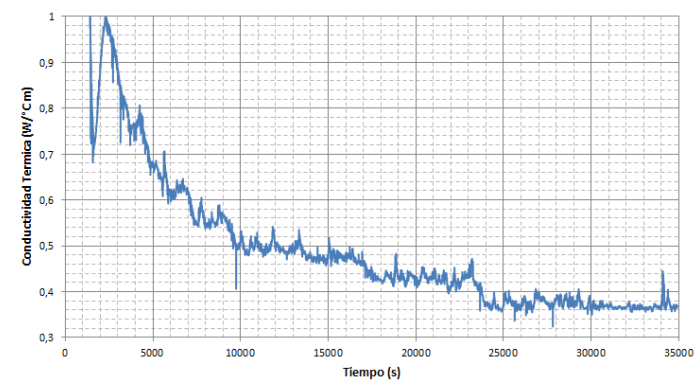
**Figura 145 Plano de bloque de cemento prensado**



**Figura 146 Temperaturas promedio de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque de cemento prensado**



**Figura 147 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque de cemento prensado**



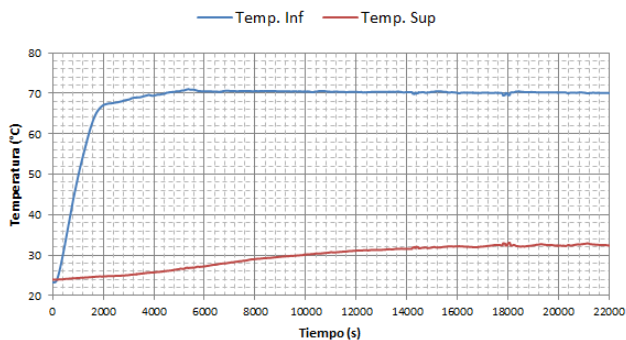
**Figura 148 Conductividad térmica del bloque de cemento prensado**

**MATERIAL: BLOQUE SPLIT**

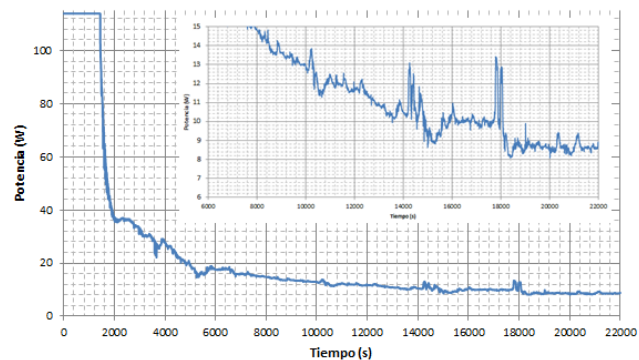
DIMENSIONES: 0.15X0.19X0.39 m  
VOLUMEN APARENTE: 11115 cm<sup>3</sup>  
MASA: 14462 gr  
DENSIDAD APARENTE: 1,3011 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 507.438 Kg/m<sup>2</sup>  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.751 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.259 m<sup>2</sup> °C/ W  
PRECIO: 2300



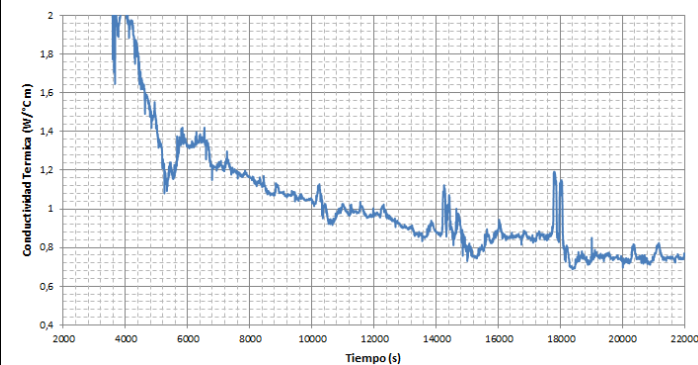
**Figura 149 Plano de bloque split**



**Figura 150 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque split**



**Figura 151 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque split**



**Figura 152 Conductividad térmica del bloque split**

**MATERIAL: BLOQUE LISO**

DIMENSIONES: 0.09 X 0.19 X 0.39 m  
VOLUMEN APARENTE: 6669 cm<sup>3</sup>  
MASA: 9593.3 gr  
DENSIDAD APARENTE: 1.4385 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 129.46 Kg/m<sup>2</sup>  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.499 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.180 m<sup>2</sup> °C/W  
PRECIO: 1780

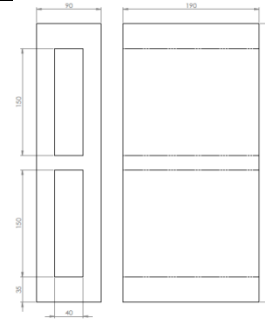


Figura 153 Plano de bloque liso

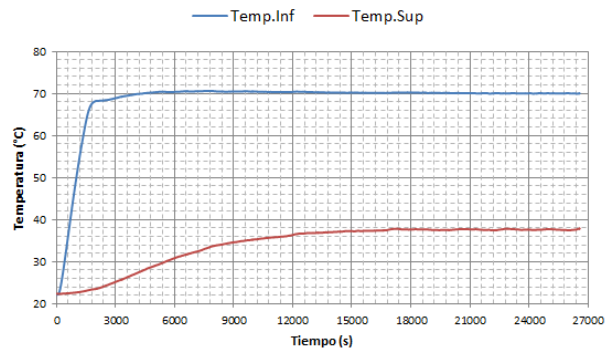


Figura 154 Temperaturas promedio de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque liso

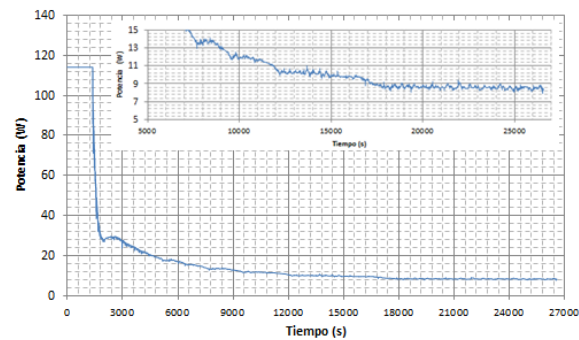


Figura 155 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque liso

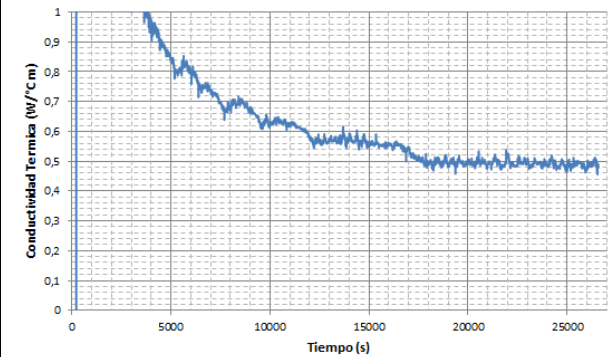


Figura 156 Conductividad térmica de bloque liso

**MATERIAL: BLOQUE LISO ESTRUCTURAL**

DIMENSIONES: 0.39 X 0.19 X 0.14 m  
VOLUMEN APARENTE: 10374 cm<sup>3</sup>  
MASA: 10362 gr  
DENSIDAD APARENTE: 0.998 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 161.94 Kg/m<sup>2</sup>  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.462 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.302 m<sup>2</sup> °C/W  
PRECIO: 2700

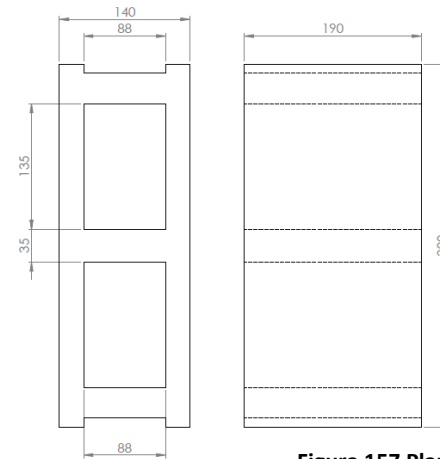


Figura 157 Plano de bloque liso estructural

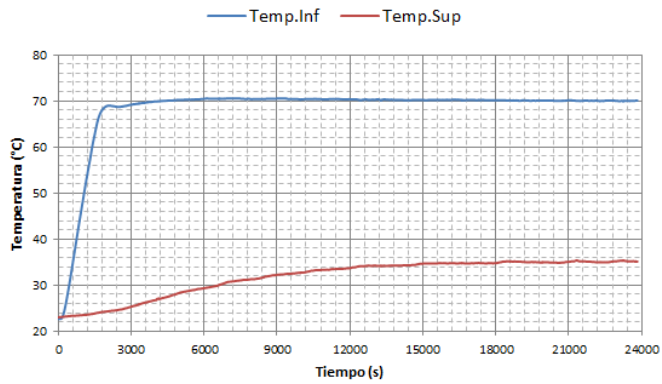


Figura 158 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque liso estructural

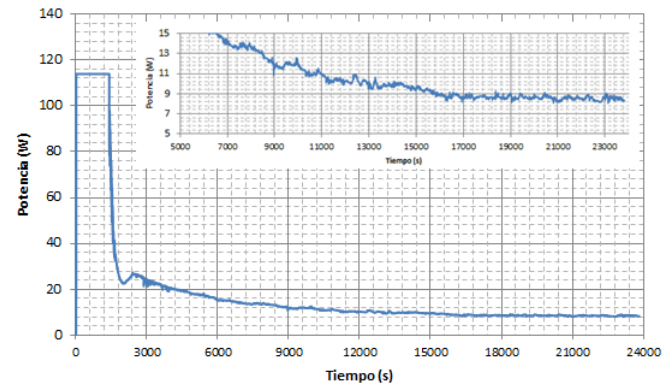


Figura 159 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque liso estructural

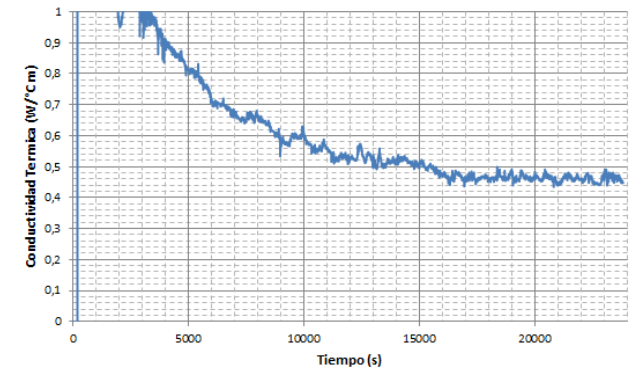
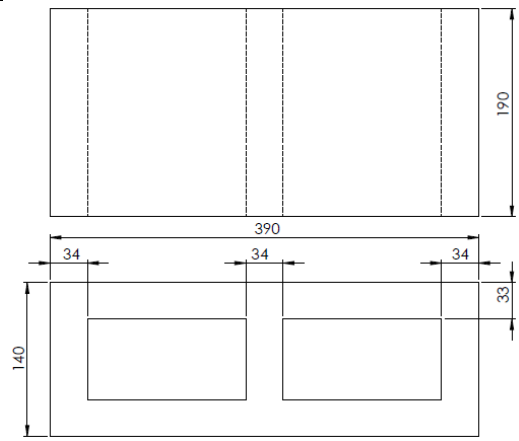


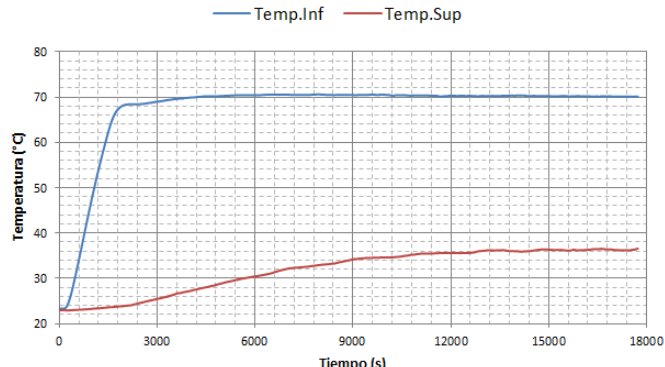
Figura 160 Conductividad térmica de bloque liso estructural

**MATERIAL: BLOQUE LISO No 10**

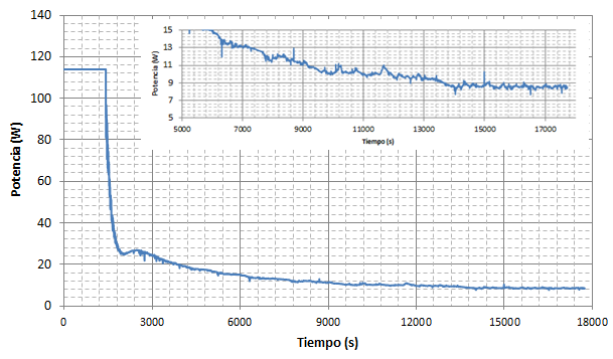
DIMENSIONES: 0.09 X 0.19 X 0.39 m  
 VOLUMEN APARENTE: 6840 cm<sup>3</sup>  
 MASA: 8387 gr  
 DENSIDAD APARENTE: 1.226 gr/cm<sup>3</sup>  
 DENSIDAD: 92,30 Kg/m<sup>2</sup>  
 CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.333 W/m °C  
 RESISTENCIA TERMICA: 0.285 m<sup>2</sup> °C/W  
 PRECIO: 1200



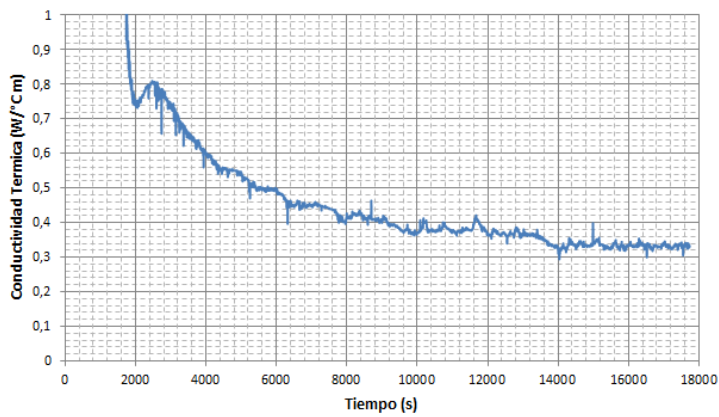
**Figura 161 Plano de bloque liso #10**



**Figura 162 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque liso #10**



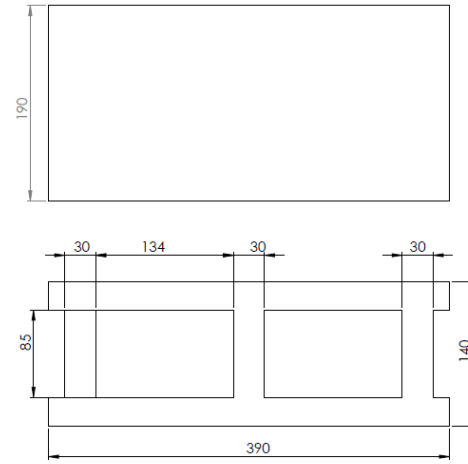
**Figura 163 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque liso #10**



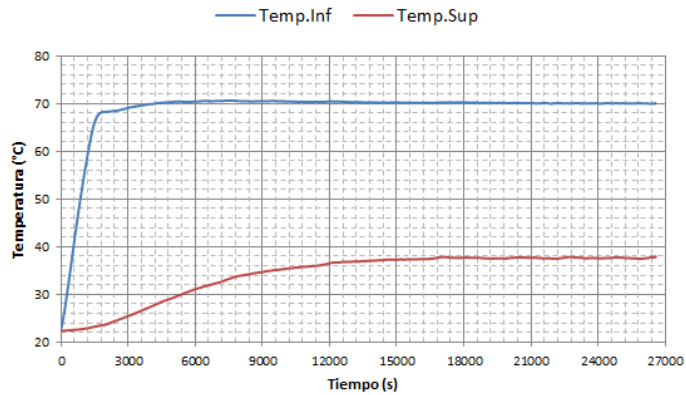
**Figura 164 Conductividad térmica de bloque liso #10**

**MATERIAL: BLOQUE LISO No 15**

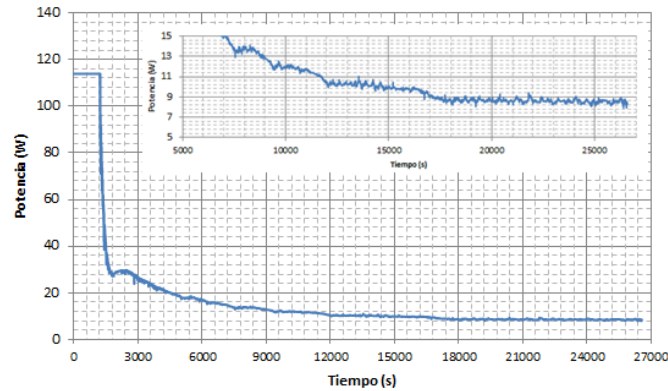
DIMENSIONES: 0.14 X 0.19 X 0.39 m  
VOLUMEN APARENTE: 10374 cm<sup>3</sup>  
MASA: 13334 gr  
DENSIDAD APARENTE: 1.285 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 179.946 Kg/m<sup>2</sup>  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.495 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.286 m<sup>2</sup> °C/W  
PRECIO: 2700



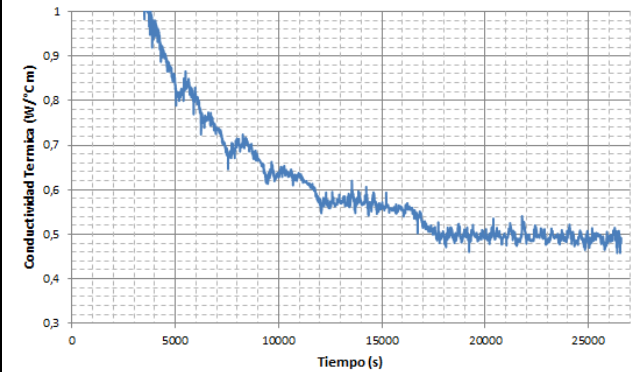
**Figura 165 Plano de bloque liso # 15**



**Figura 166 Temperaturas promedio de superficie en prueba de conductividad térmica del bloque liso #15**



**Figura 167 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica del bloque liso #15**



**Figura 168 Conductividad térmica de bloque liso #15**

**MATERIAL: FIBRA DE VIDRIO**

DIMENSIONES: 0.20X0.10X0.025 m  
VOLUMEN: 500 cm<sup>3</sup>  
MASA: 39.3 gr  
DENSIDAD:0.0786 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 1.965 Kg/m<sup>2</sup>  
CONDUCTIVIDAD TERMICA:0.0404 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA:0.6175 m<sup>2</sup> °C / W  
PRECIO:

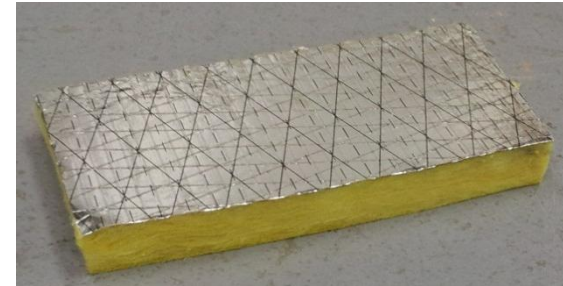


Figura 169 Muestra de fibra de vidrio

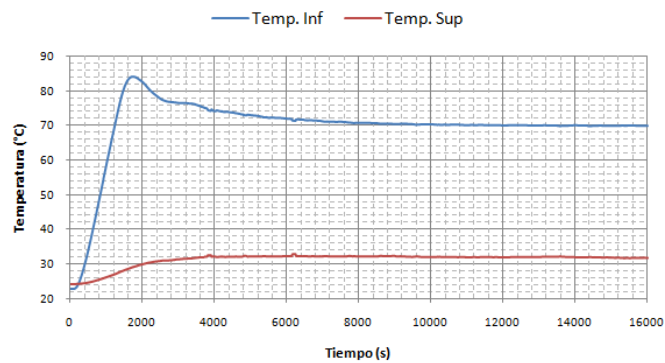


Figura 170 Temperaturas promedio de superficie en prueba de conductividad térmica de fibra de vidrio

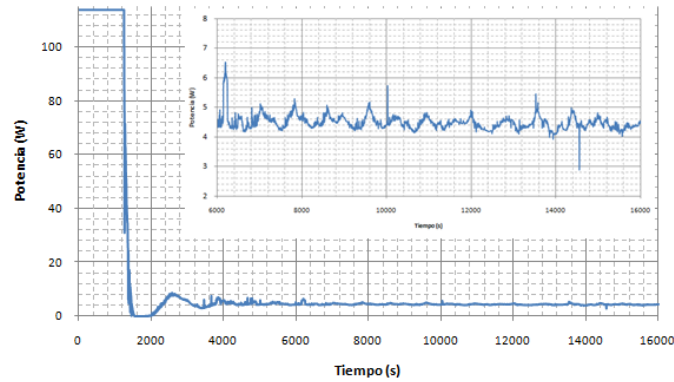


Figura 171 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica de fibra de vidrio

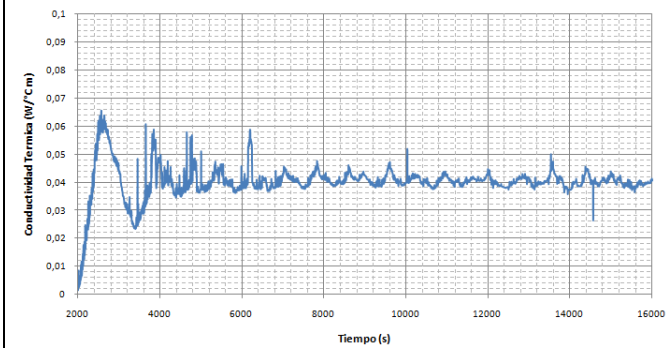
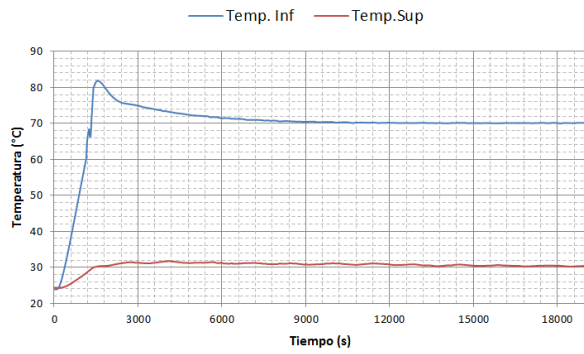


Figura 172 Conductividad térmica de fibra de vidrio

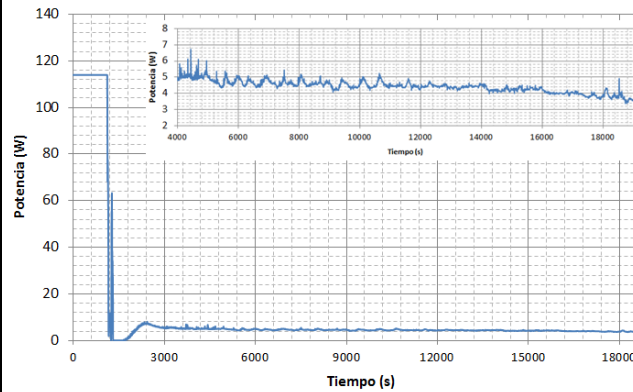


**MATERIAL: POLIESTIRENO EXPANDIDO**

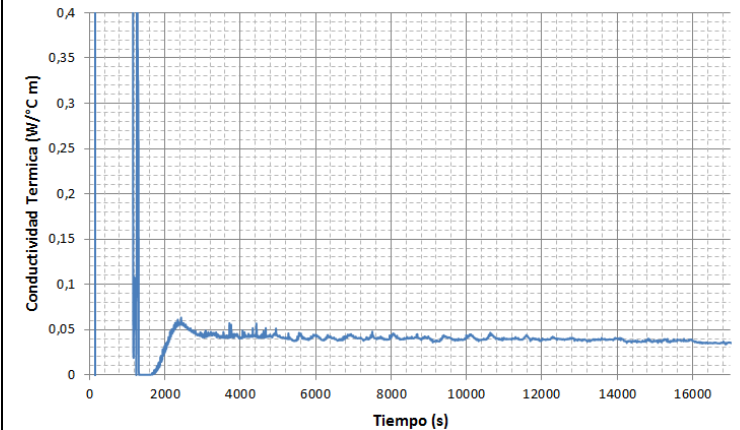
DIMENSIONES: 0.20X0.40X0.03 m  
VOLUMEN: 2400 cm<sup>3</sup>  
MASA: gr  
DENSIDAD: gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: Kg/m<sup>2</sup>  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.0379 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.791 m<sup>2</sup> °C / W  
PRECIO:



**Figura 173** Temperaturas promedio de superficie en prueba de conductividad térmica de poliestireno expandido, tipo I



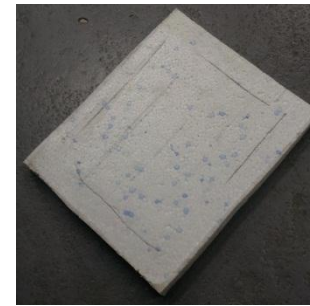
**Figura 174** Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica de poliestireno expandido, tipo I



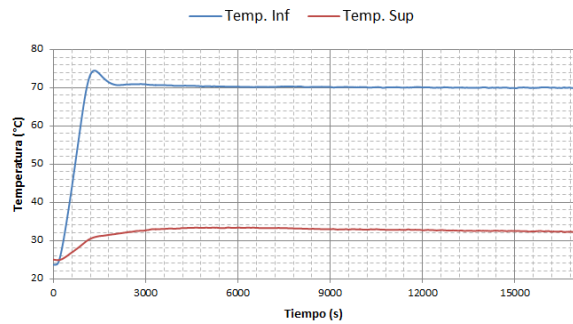
**Figura 175** Conductividad térmica de poliestireno expandido, tipo I

**MATERIAL: POLIESTIRENO EXPANDIDO**

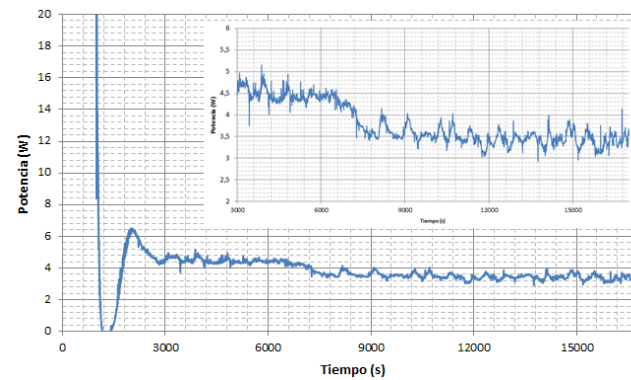
DIMENSIONES: 0.20X0.23X0.016 m  
VOLUMEN: 736 cm<sup>3</sup>  
MASA: 16.1 gr  
DENSIDAD: 0.0218 gr/cm<sup>3</sup>  
DENSIDAD: 0.3488 Kg/m<sup>2</sup>  
CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0.055 W/m °C  
RESISTENCIA TERMICA: 0.288 m<sup>2</sup> °C/W  
PRECIO:



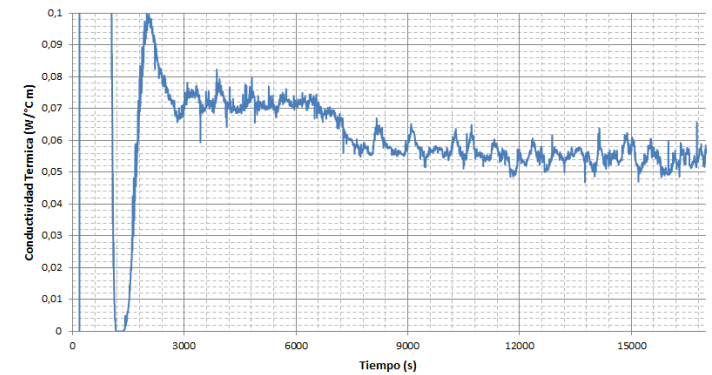
**Figura 176 Poliestireno expandido 2**



**Figura 177 Temperaturas promedios de superficie en prueba de conductividad térmica de poliestireno expandido, tipo II**



**Figura 178 Potencia consumida por resistencia térmica en prueba de conductividad térmica de poliestireno expandido, tipo II**



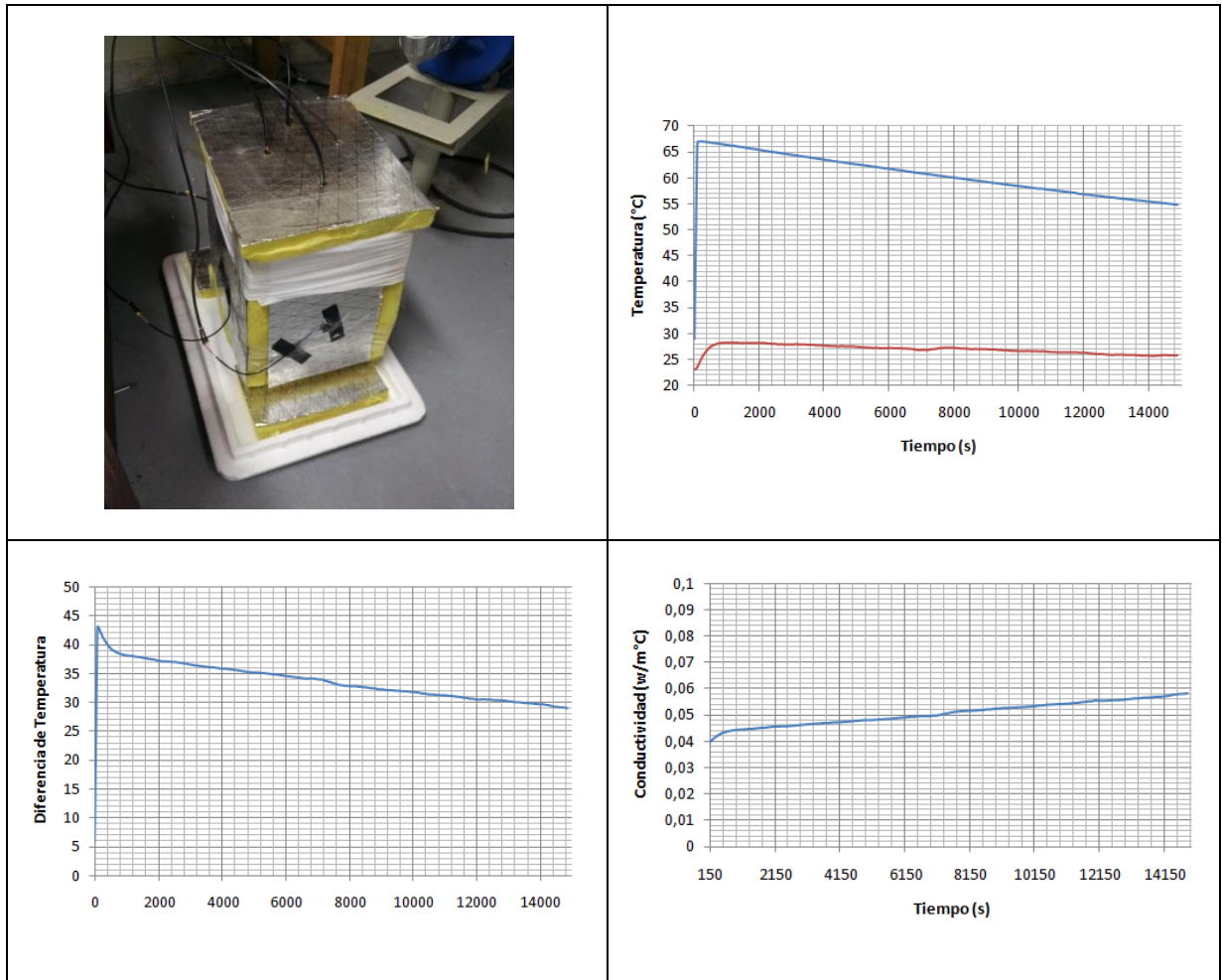
**Figura 179 Conductividad térmica poliestireno expandido, tipo II**

## ANEXO C-Prueba alterna de conductividad térmica para aislantes

### Prueba alterna de conductividad térmica para aislantes

Este procedimiento fue realizado con la fibra de vidrio para verificar lo obtenido con el equipo de medición

Tabla 15 Resultados de prueba alterna de medición de conductividad térmica de fibra de vidrio



## ANEXO D-Pruebas de calor específico

### 1. Pruebas de Calor específico

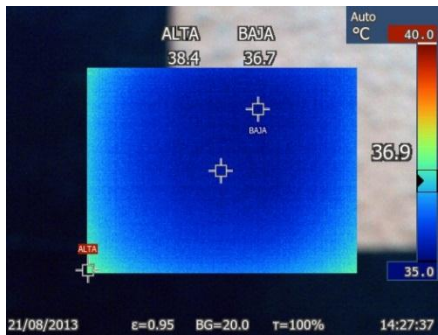
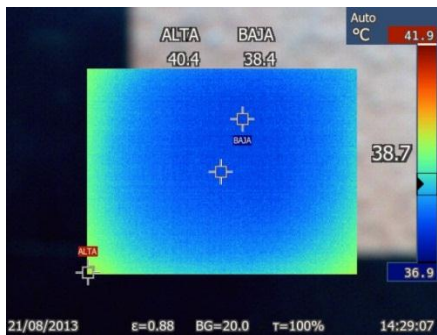
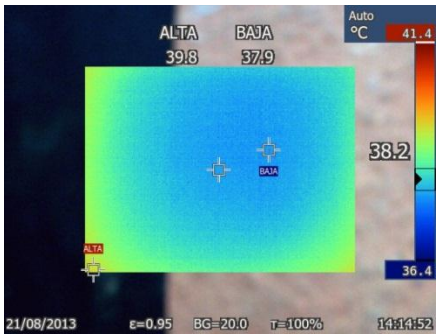
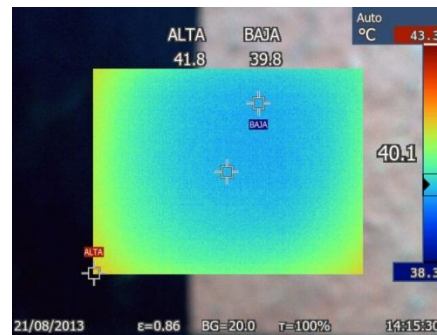
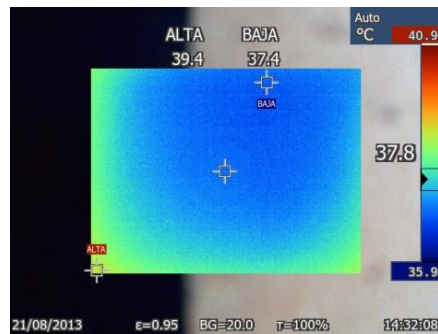
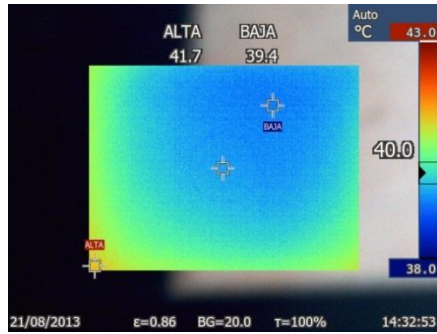
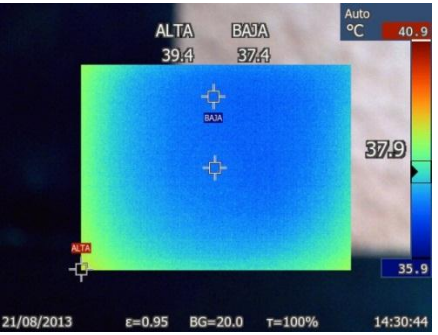
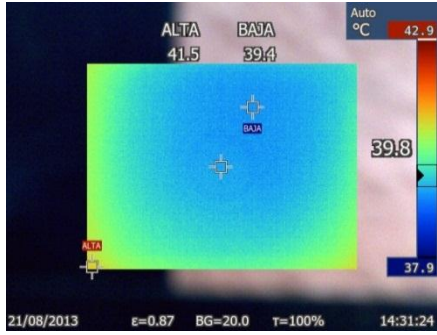
Elemento Constructivo		Agua		Aire		Elemento constructivo			
		Temperatura Inicial (°C)	Masa (kg)	Altura (cm)	Masa (kg)	Temperatura Inicial (°C)	Masa (kg)	Temperatura Final (°C)	Calor específico (kJ/kg °C)
1	Ladrillo #3 0.40X0.20X0.09 m	29	10	21	0.026	200	5.134	44	836
2	Ladrillo #6 0.40X0.20X0.15 m	29	16	9	0.011	20	8.390	47	938
3	Ladrillo común 0.17x0.08x0.04 m	31	4	21	0.026	200	0.840	36.8	709
4	Tolete macizo #3 0.20 x0.10x0.03 m	31	4	21	0.026	200	1.245	40.4	793
5	Bocadillo de enchape 0.24 x 0.07 x0.05 cm	30	6	19	0.024	200	1.234	35.8	719
7	Tolete#2 2 huecos 0.24 x 0.12 x 0.06 m	30	6	19	0.024	200	1.970	39.2	730
9	Prensado liviano 0.245x0.12x0.06 m	31	8	17	0.021	200	2.661	41.7	851
10	Tolete #3 estructural 0.24 x0.12x0.06 m	30	8	17	0.021	200	2.112	38.6	845
11	Tolete #1 perforado 0.24x0.12x0.06 m	30.7	8	17	0.021	200	2.589	40.37	812
12	Bloque de cemento 0.35x0.15x0.9 m	30.7	10	15	0.019	200	5.444	47.5	847
13	Bloque de cemento 0.40x0.20x0.15 m	30.4	13.5	8	0.010	200	10.983	54.9	869
14	Bloque split 0.15x0.19x0.39 m	26.8	13.5	8	0.010	200	14.462	56	792
15	Bloque liso 0.09x0.19x0.39 cm	29.7	10	10	0.012	200	9.593	58.3	880
16	Bloque liso 0.14x0.19x0.39 m	30.4	13.5	15	0.019	200	10.374	55.7	955
17	Bloque liso #10 0.09x0.19x0.39 m	28.1	10	15	0.019	200	8.330	52	811

Elemento Constructivo		Agua		Aire		Elemento constructivo			
		Temperatura Inicial (°C)	Masa (kg)	Altura (cm)	Masa (kg)	Temperatura Inicial (°C)	Masa (kg)	Temperatura Final (°C)	Calor específico (kJ/kg °C)
18	Bloque liso #15 0.14 x 0.19 x 0.39 m	27.7	13.5	8	0.010	200	13.334	56	833
19	Mortero 0.40x0.20x0.015 m	25.4	1.5	21	0.026	200	1.584	52.9	744
20	Fibra de vidrio 0.40x0.20x0.025 m	-	-	-	0.000	200	-	-	-
21	Poliestireno expandido (1) 0.40x0.20x0.03 m	-	-	-	0.000	200	-	-	-
22	Poliestireno expandido (2) 0.18x0.15x0.016 m	-	-	-	0.000	200	-	-	-

Calor específico del agua: 4.186 kJ/kg °C, Calor específico del aire: 1.012 kJ/kg °C, Área transversal de aire: 42 x 25 cm<sup>2</sup>

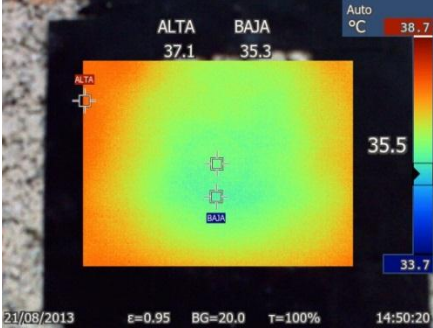
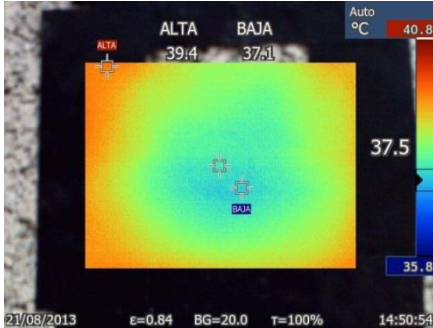
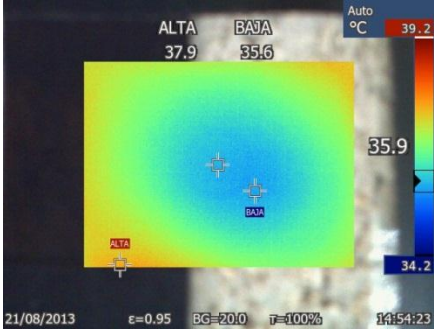
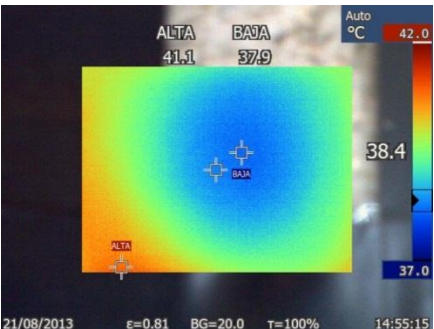
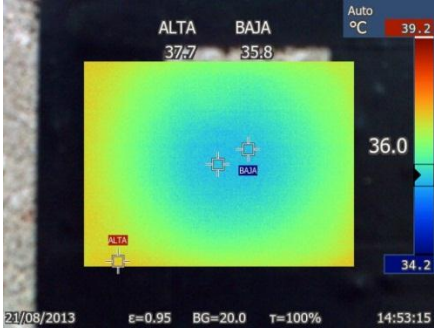
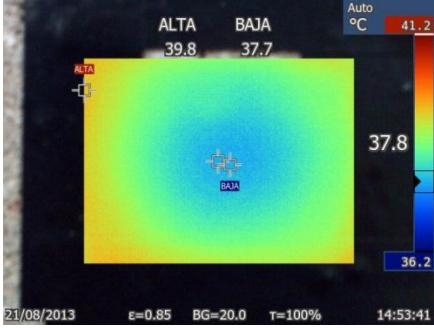
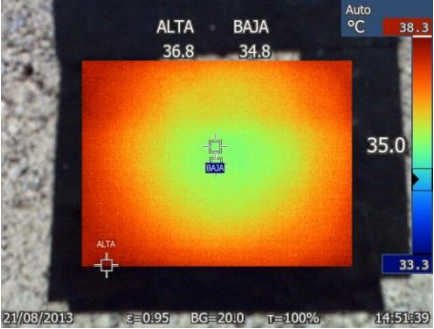
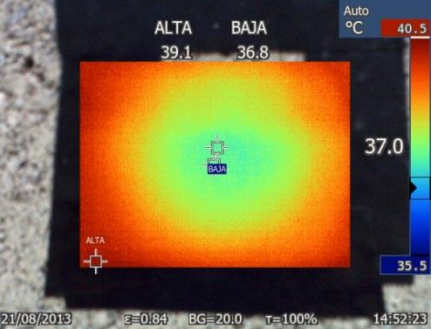
**ANEXO E- Pruebas de emisividad**  
**1. Pruebas de Emisividad**

	Material	Emisividad ajustada 0.95	Emisividad del material	Emisividad
1	Ladrillo #3 0.40X0.20X0.09 m			0,86
2	Ladrillo #6 0.40X0.20X0.15 m			0,82
3	Ladrillo común 0.17x0.08x0.04 m			0,83
4	Tolete macizo #3 0.20 x0.10x0.03 m			0,85

Material		Emisividad ajustada 0.95	Emisividad del material	Emisividad
5	Bocadillo de enchape 0.24 x 0.07 x 0.05 m			0,88
6	Tolete#2 2 huecos 0.24 x 0.12 x 0.06 m			0,86
7	Prensado liviano 0.245x0.12x0.06 m			0,86
8	Tolete #3 estructural 0.24 x 0.12x0.06 m			0,87

Material		Emisividad ajustada 0.95	Emisividad del material	Emisividad
9	Tolete #1 perforado 0.24x0.12x0.06 m			0,84
10	Bloque de cemento 0.35x0.15x0.09 m			0,84
11	Bloque de cemento prensado 2 celdas 0.40x0.20x0.15 m			0,85
12	Bloque split 0.15x0.19x0.39 m			0,86



Material		Emisividad ajustada 0.95	Emisividad del material	Emisividad
13	Bloque liso 0.09x0.19x0.39 m			0,84
14	Bloque liso 0.14x0.19x0.39 m			0,81
15	Bloque liso #10 0.09x0.019x0.39 m			0,85
16	Bloque liso #15 0.14 x0.19x 0.39 m			0,84

Material		Emisividad ajustada 0.95	Emisividad del material	Emisividad
17	Mortero 0.40x0.20x0.015 m			0.83
18	Fibra de vidrio 0.4x0.2x0.025			0,81
19	Poliestireno expandido (1) 0.40x0.20x0.03 m			0,84
20	Poliestireno expandido (2) 0.18x0.15x0.016 m			0,86

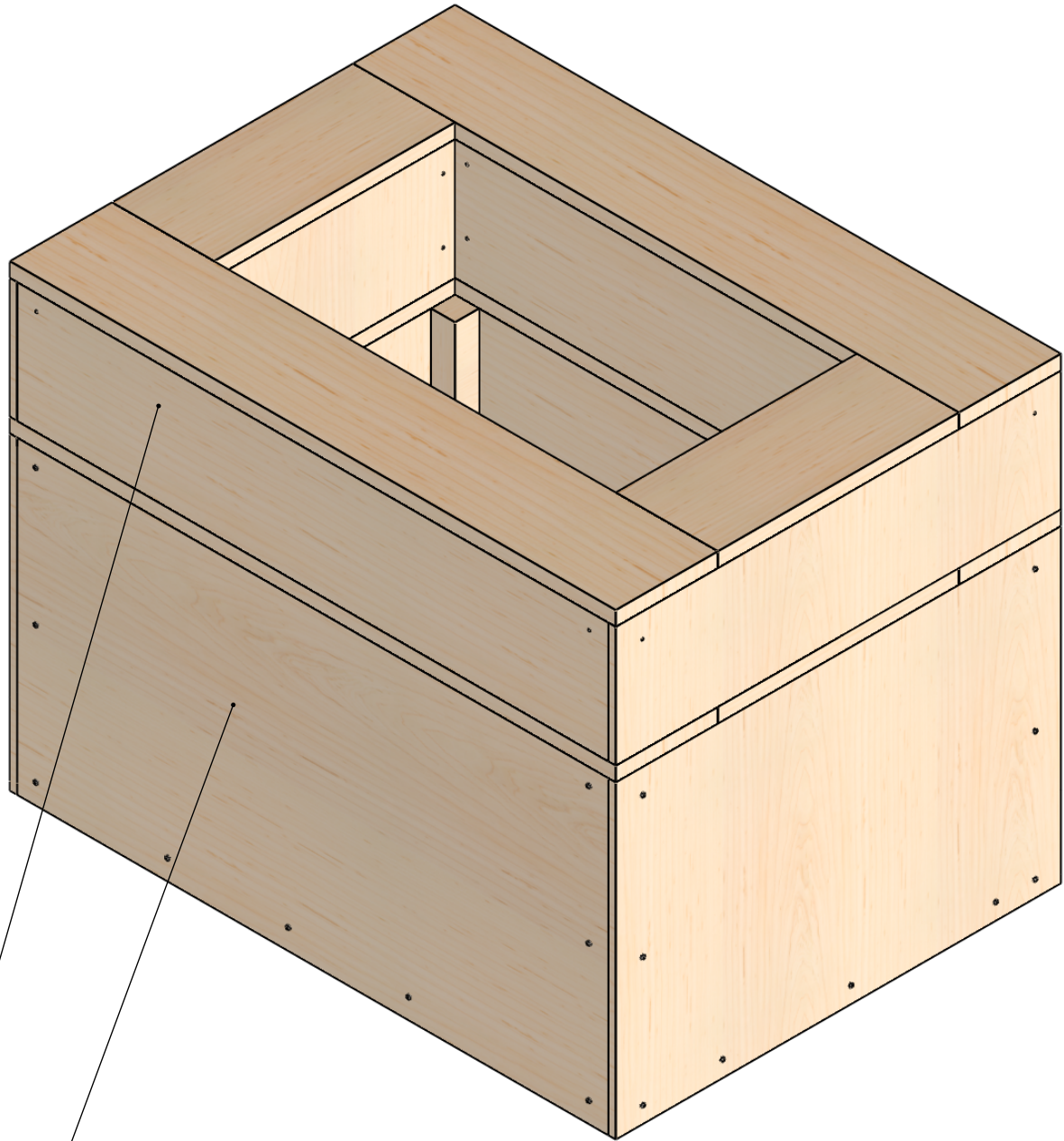
## ANEXO F-Índice de materiales identificado por la ASHRAE

Group No.	Description of Construction	Weight (lb/ft <sup>2</sup> )	U-Value (Btu/h ft <sup>2</sup> °F)	Symbol
4-in Face + (brick)				
C	Air space + 4-in. Face brick	83	0.358	
D	4-in common brick	90	0.415	◆
C	1-in. Insulation or air space + 4in. Common brick	90	0.174-0.301	■
B	2-in. Insulation + 4-in. Common brick	88	0.111	◆
B	8-in. Comoon brick	130	0.302	▲
A	Insulation or air space + 8-in. Common brick	130	0.154-0.243	▲ -
4-in. Face brick + (heavyweight concrete)				
C	Air space + 2in. Concrete	94	0.35	
B	2-in. Insulation + 4in.concrete	97	0.116	◆
A	Air space or insulation + 8-in or more concrete	143-190	0.110-0.112	▲ ■
4-in Face brick + (light or heavyweight concrete block)				
E	4-in. Block	62	0.319	
D	Air space or insulation + 4-in. Block	62	0.153-0.246	●
D	8-in. Block	70	0.274	■
C	Air space or 1-in. Insulation + 6in. Or 8-in block	73-89	0.221-0.275	■
B	2-in. Insulation + 8-in. Block	89	0.096-0.107	◆ ▲
4-in. Face brick + (clay tile)				
D	4-in. Tile	71	0.381	■
D	Air space + 4-in. Tile	71	0.281	■
C	Insulation + 4-in. Tile	71	0.169	◆
C	8-in. Tile	96	0.275	◆
B	Air space + 1-in. Or 2-in. Insulation + 8-in. Tile	96	0.142-0.221	▲
A	2-in.insulation + 8-in. Tile	97	0.097	-
Heavyweight concrete wall + (finish)				
E	4-in. Concrete	63	0.585	●
D	4-in. Concrete + 1-in. Or 2-in. Insulation	63	0.119-0.200	■
C	2-in. Insulation + 4-in.concrete	63	0.119	◆
C	8-in. Concrete	109	0.49	◆
B	8-in. Concrete + 1-in. Or 2-in. Insulation	110	0.115-0.187	▲
A	2-in. Insulation + 8-in. Concrete	110	0.115	▲
B	12-in. Concrete	156	0.421	▲
A	12-in. Concrete + insulation	156	0.113	-

Light and heavyweight concrete block + (finish)				
F	4-in. Block + air space/insulation	29	0.161-0.263	×
E	2-in. Insulation + 4-in. Block	29-37	0.105-0.114	●
E	8-in. Block	47-51	0.294-0.402	●
D	8-in. Block + air space/insulation	41-57	0.149-0.173	■
Clay tile + (finish)				
F	4-in. Tile	39	0.419	×
F	4-in. Tile + air space	39	0.303	×
E	4-in. Tile + 1-in. Insulation	39	0.175	●
D	2-in. Insulation + 4-in. Tile	40	0.11	■
D	8-in. Tile	63	0.296	■
C	8-in. Tile + air space/1-in. insulation	63	0.151-0.231	◆
B	2-in. Insulation + 8-in. Tile	63	0.099	■
Metal curtain wall				
G	With/without air space + 1-to 3-in. Insulation	5-6	0.091-0.230	■
Frame wall				
G	1-in. To 3-in. Insulation	16	0.081-0.178	■

## **ANEXO G-Planos de equipo de medición de conductividad térmica**

Nota: Todas las medidas estan en mm a menos que se especifique lo contrario

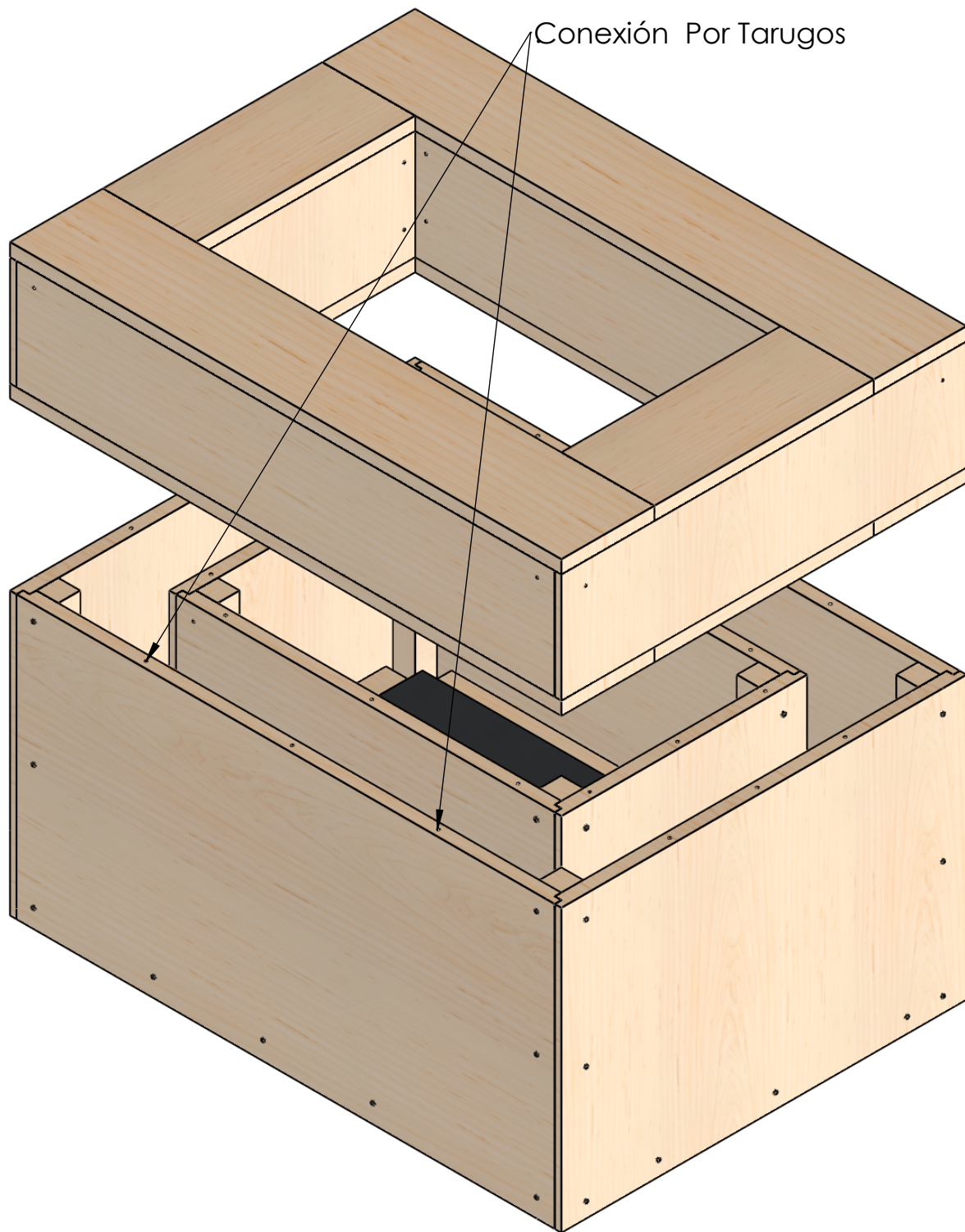


2  
1

N° de Ensamble	Nombre
1	Cavidad Inferior
2	Cavidad Superior

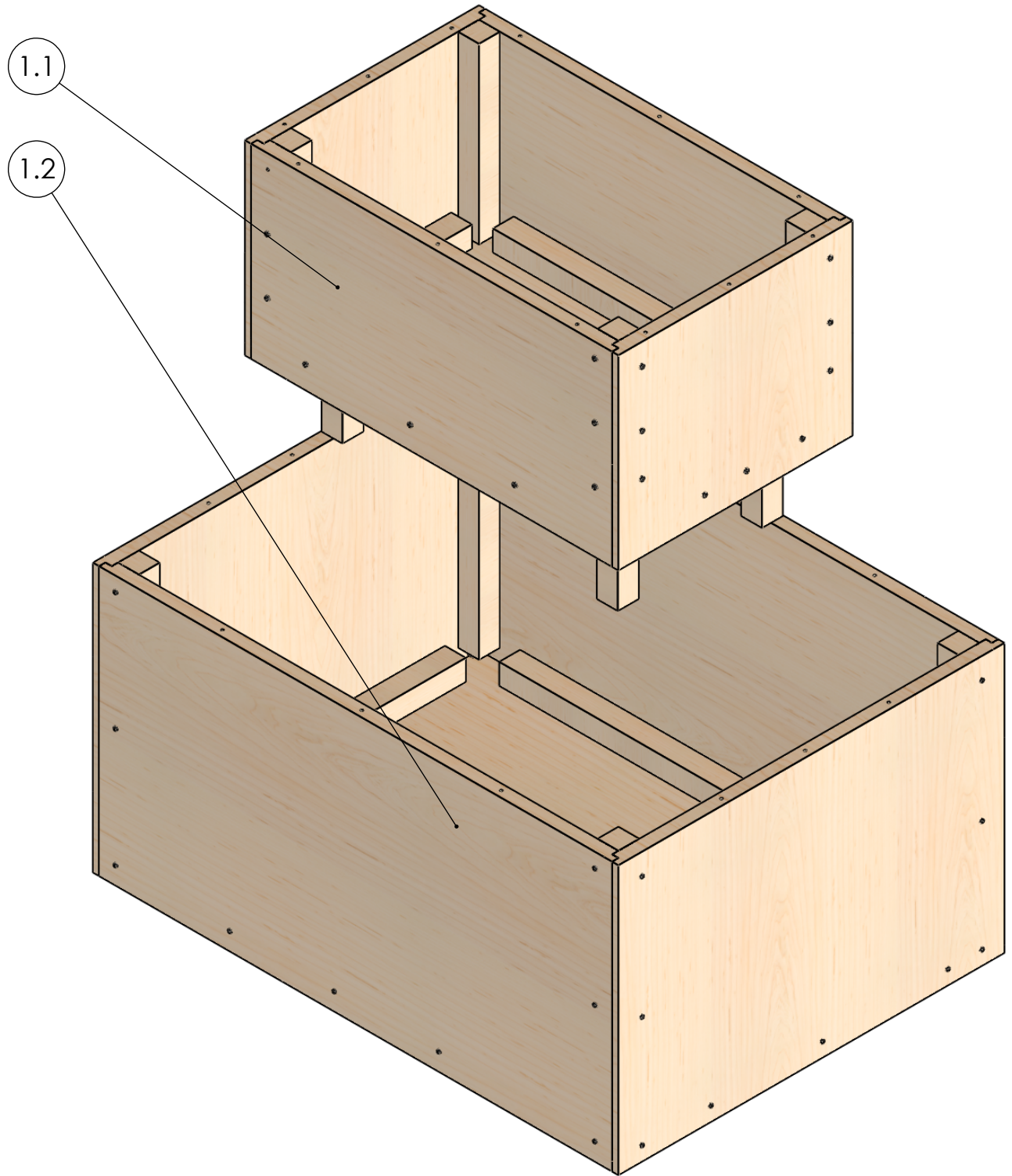
Marca	N° Piezas	Designación y observaciones		Norma	Material y Medidas	Peso (g)
		Fecha	Nombre	Firma	Tol. no indicadas DIN 16901-110B	
Dibujado		04/09/12	Eduardo Eduardo			Escala x:x
Revisado		04/09/12	Antonio Bula			
Comprobado		04/09/12	Fábian Amaya			
Conjunto Ensamble Global					<b>EdiSost</b>	
Título	Equipo de medición de propiedades Térmicas			Conjunto N°:		A4
				Plano N°:		

Nota: Todas las medidas estan en mm a menos que se especifique lo contrario



Marca	Nº Piezas	Designación y observaciones		Norma	Material y Medidas	Peso (g)
		Fecha	Nombre	Firma	Tol. no indicadas DIN 16901-110B	
Dibujado		04/09/12	Eduardo Eduardo			Escala
Revisado		04/09/12	Antonio Bula			x:x
Comprobado		04/09/12	Fábian Amaya			
Conjunto Explosión ensamble global					<b>EdiSost</b>	
Título	Equipo de medición de propiedades Térmicas			Conjunto Nº:	A4	
				Plano Nº:		

Nota: Todas las medidas estan en mm a menos que se especifique lo contrario



Nº de Subensamblé	Nombre
1.1	Cavidad inferior-Interior
1.2	Cavidad inferior-exterior

Marca	Nº Piezas	Designación y observaciones	Norma	Material y Medidas	Peso (g)
		Fecha	Nombre	Firma	Tol. no indicadas DIN 16901-110B
Dibujado	04/09/12	Eduardo Eduardo			Escala
Revisado	04/09/12	Antonio Bula			x:x
Comprobado	04/09/12	Fábian Amaya			
Conjunto				<h1>EdiSost</h1>	
Explosión Equipo Parte inferior. Parte 1					
Título	Equipo de medición de propiedades Térmicas			Conjunto Nº:	A4
				Plano Nº:	



Nota: Todas las medidas estan en mm a menos que se especifique lo contrario

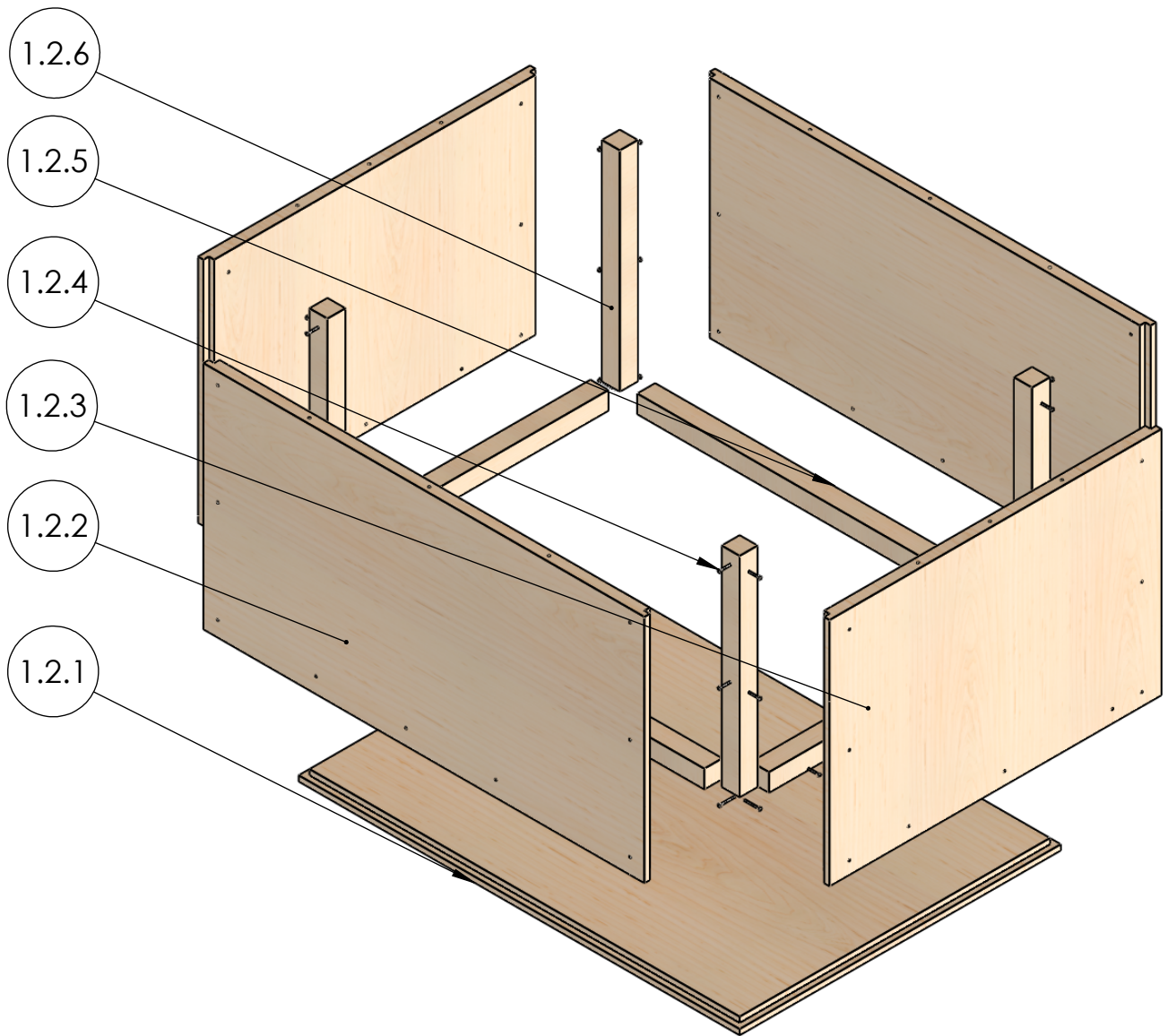
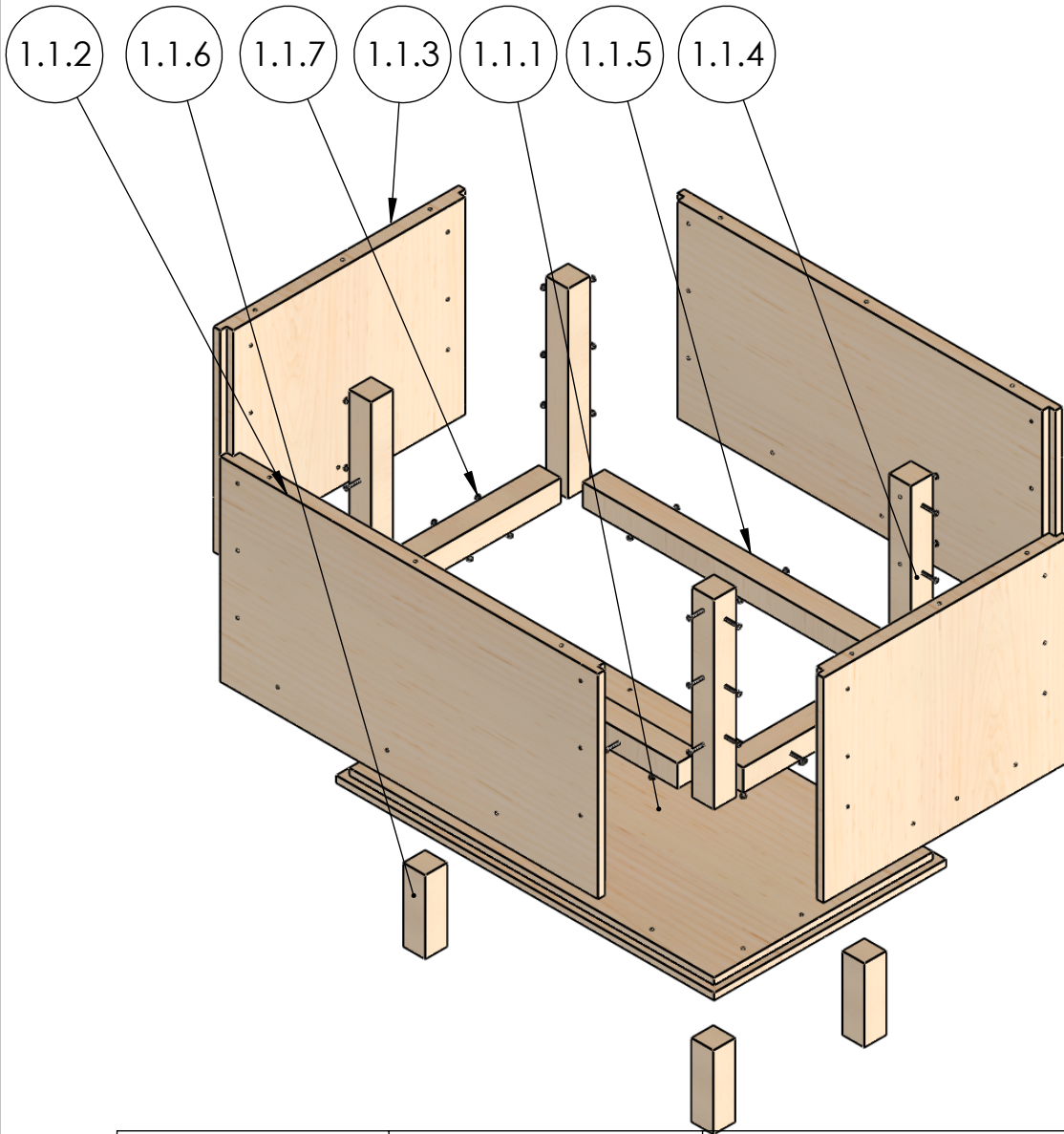


Tabla de LDM

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1.2.1	Base Inferior-externa	1
1.2.2	Largo Inferior-externa	2
1.2.3	Ancho inferior-externa	2
1.2.4	Tornillos	X
1.2.5	Liston 1	4
1.2.6	Liston 2	4
7	Liston 3	36

Marca	Nº Piezas	Designación y observaciones	Norma	Material y Medidas	Peso (g)
		Fecha	Nombre	Firma	Tol. no indicadas DIN 16901-110B
Dibujado	04/09/12	Eduardo Eduardo			Escala
Revisado	04/09/12	Antonio Bula			x:x
Comprobado	04/09/12	Fábian Amaya			
Conjunto				<h1 style="text-align: center;">EdiSost</h1>	
Explosión caja exterior- Parte inferior 1.2					
Título				Conjunto N°:	A4
Equipo de medición de propiedades Térmicas				Plano N°:	

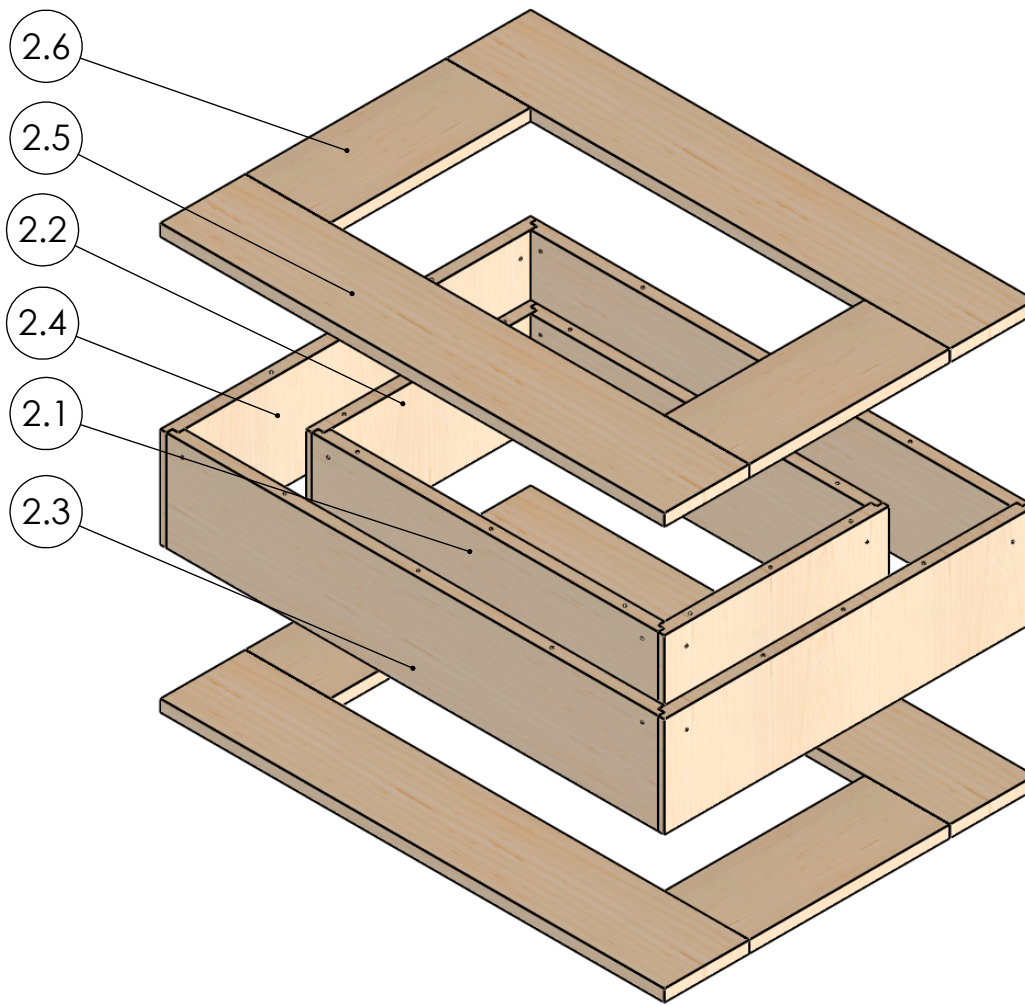
Nota: Todas las medidas estan en mm a menos que se especifique lo contrario



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1.1.1	Base	1
1.1.2	Largo	2
1.1.3	Ancho	2
1.1.4	Liston	4
1.1.5	Liston2	2
1.1.6	Soportes	4
1.1.7	Liston 4	2
9	B18.6.7M - M3 x 0.5 x 25 Type I Cross Recessed PHMS -- 25N	47

Marca	Nº Piezas	Designación y observaciones	Norma	Material y Medidas	Peso (g)
		Fecha	Nombre	Firma	Tol. no indicadas DIN 16901-110B
Dibujado	04/09/12	Eduardo Eduardo			Escala x:x
Revisado	04/09/12	Antonio Bula			
Comprobado	04/09/12	Fábian Amaya			
Conjunto				<h1>EdiSost</h1>	
Explosión Caja interna-Parte inferior 1.1					
Título	Equipo de medición de propiedades Térmicas			Conjunto Nº:	A4
				Plano Nº:	

Nota: Todas las medidas estan en mm a menos que se especifique lo contrario

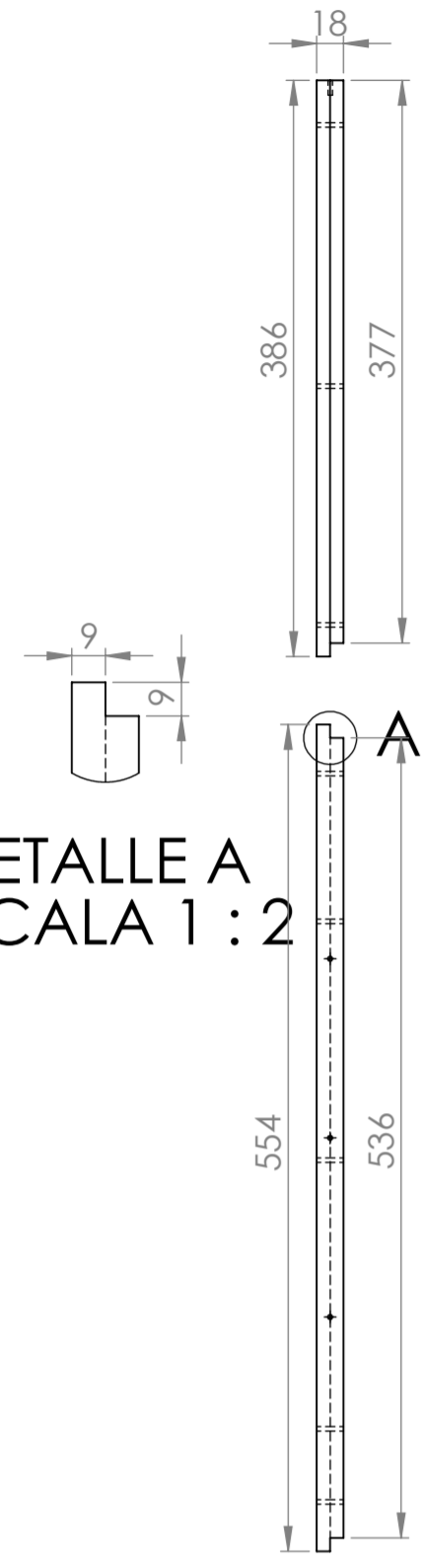


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
2.1	Cara Interna 1	2
2.2	Cara Interna 2	2
2.3	Cara Externa 1	2
2.4	Cara Externa 2	2
2.5	Tapa 1	4
2.6	Tapa 2	4

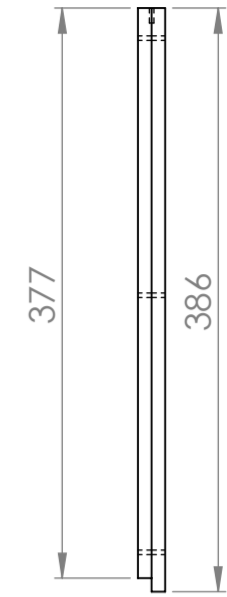
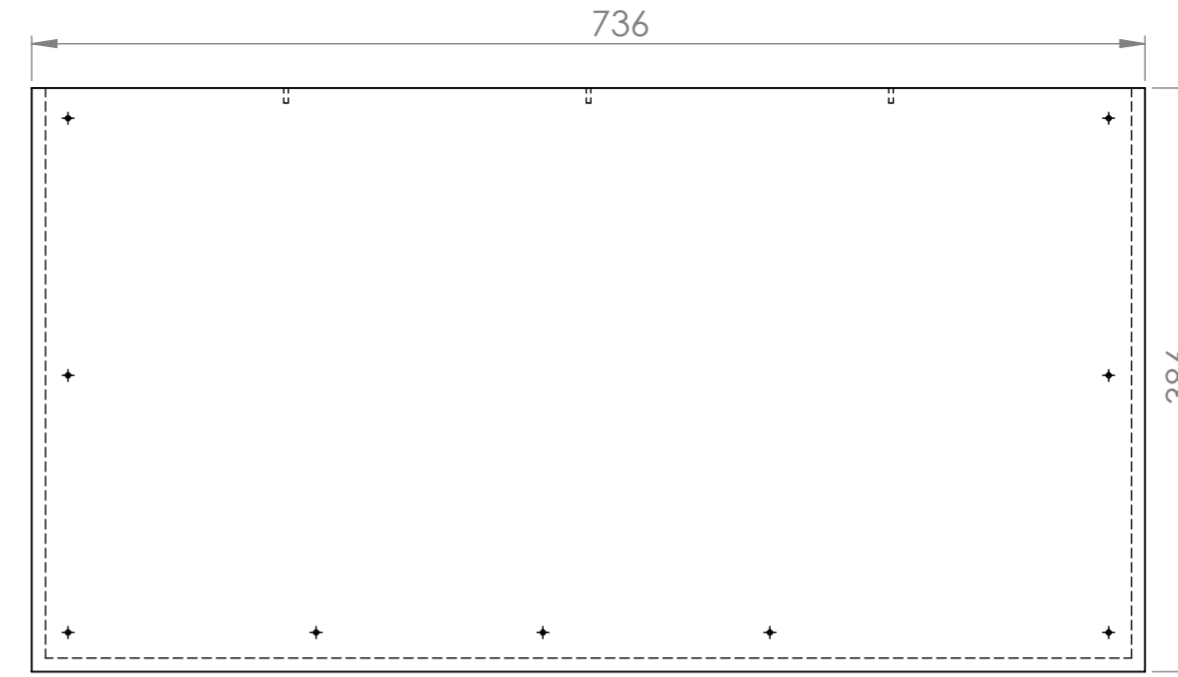
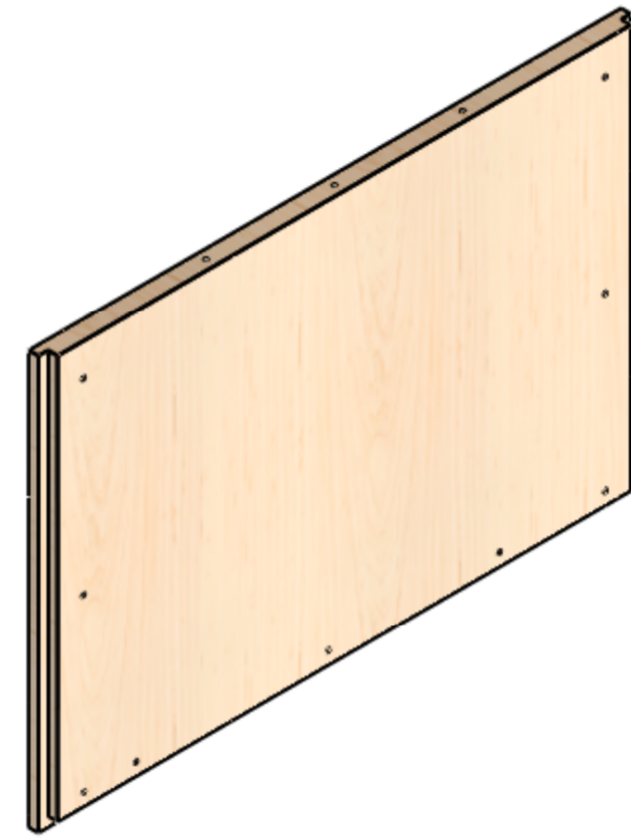
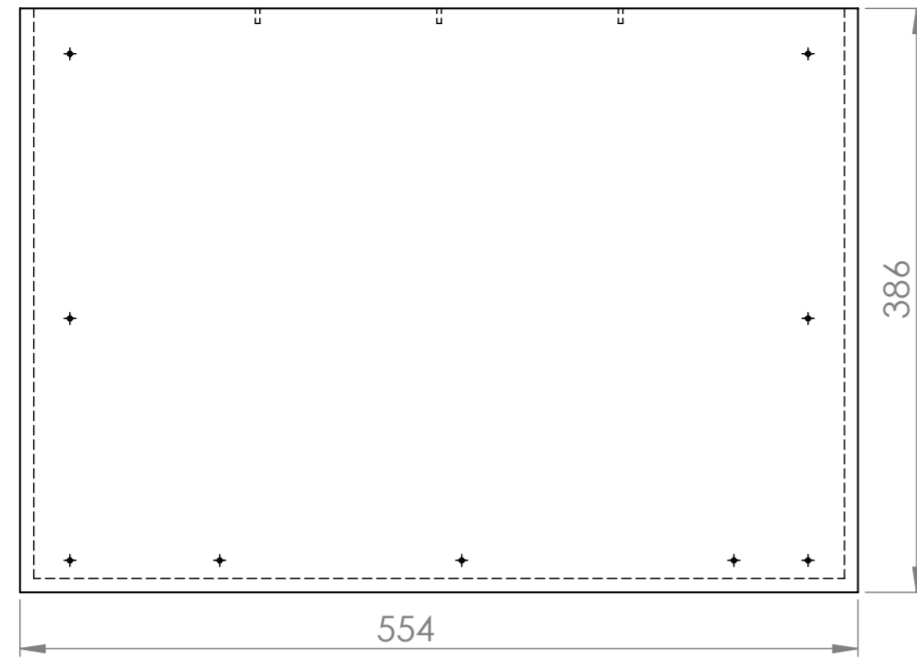
Marca	Nº Piezas	Designación y observaciones		Norma	Material y Medidas	Peso (g)
		Fecha	Nombre	Firma	Tol. no indicadas DIN 16901-110B	
Dibujado	04/09/12	Eduardo Eduardo				Escala
Revisado	04/09/12	Antonio Bula				x:x
Comprobado	04/09/12	Fábian Amaya				
Conjunto					<h1>EdiSost</h1>	
Explosión Caja Superior. Parte 2						
Título					Conjunto N°:	A4
Equipo de medición de propiedades Térmicas					Plano N°:	

ELEMENTO 1.2.3

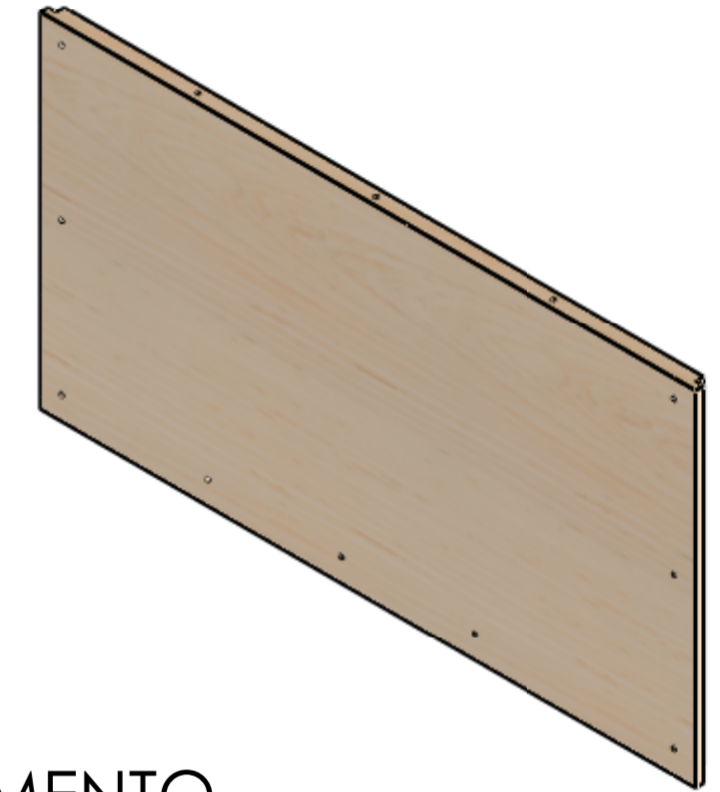
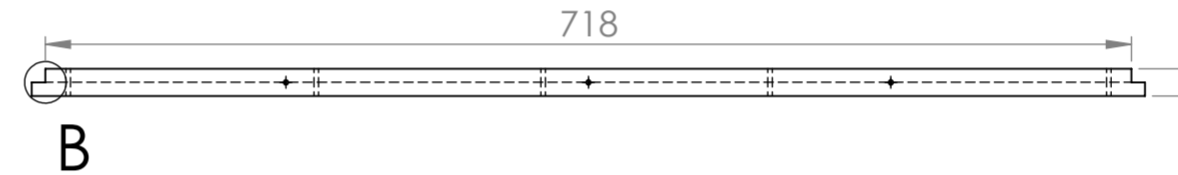
ELEMENTO 1.2.3



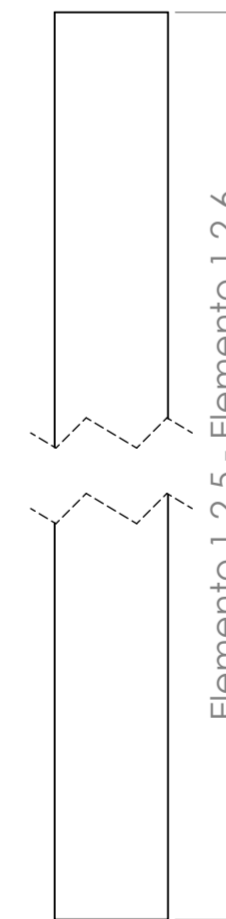
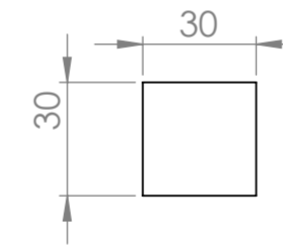
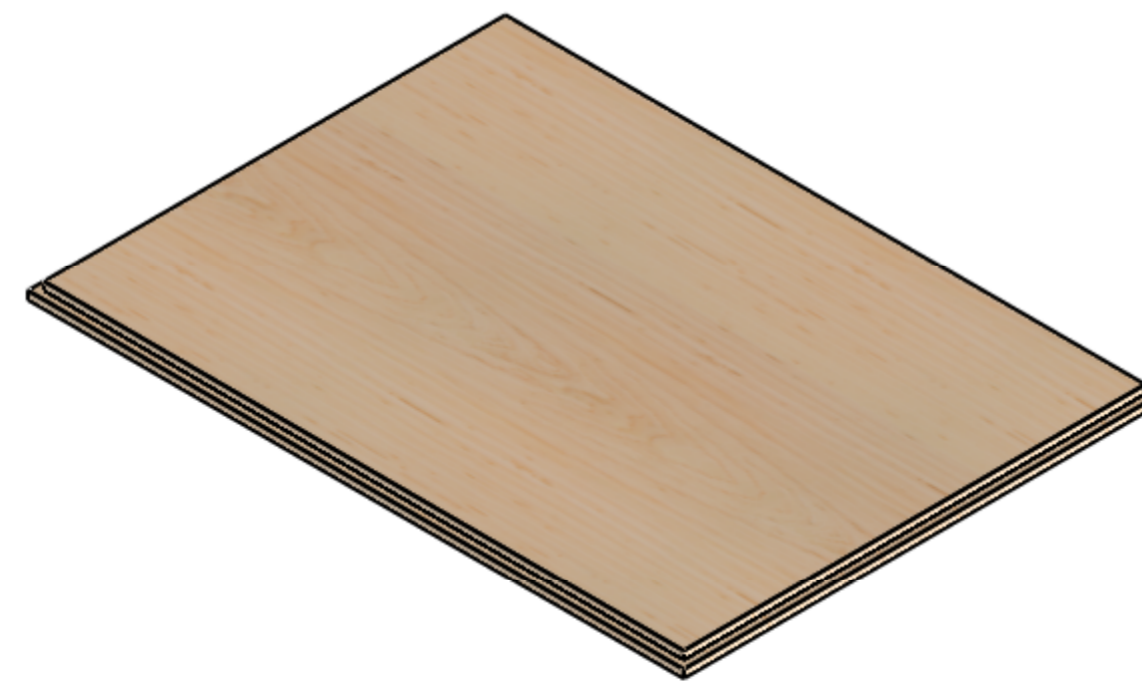
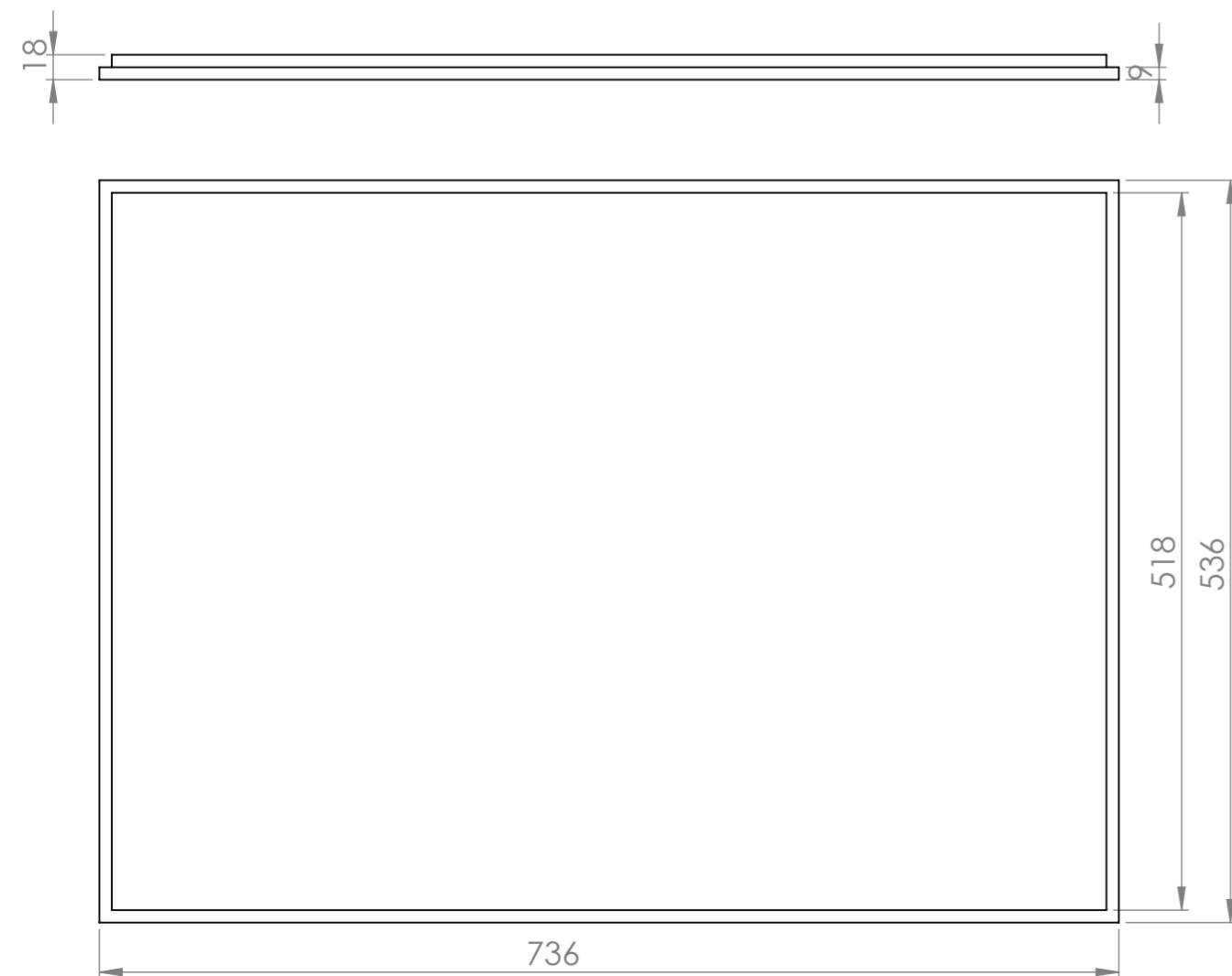
DETALLE A  
ESCALA 1 : 2



DETALLE B  
ESCALA 1 : 2



ELEMENTO 1.2.1

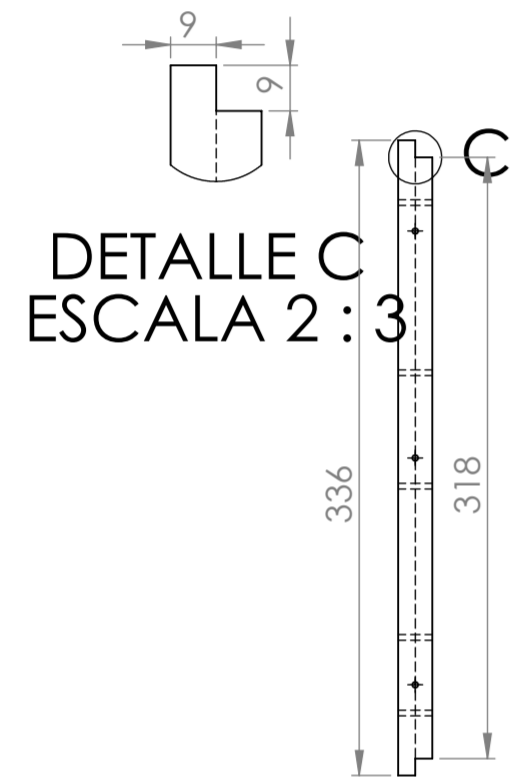
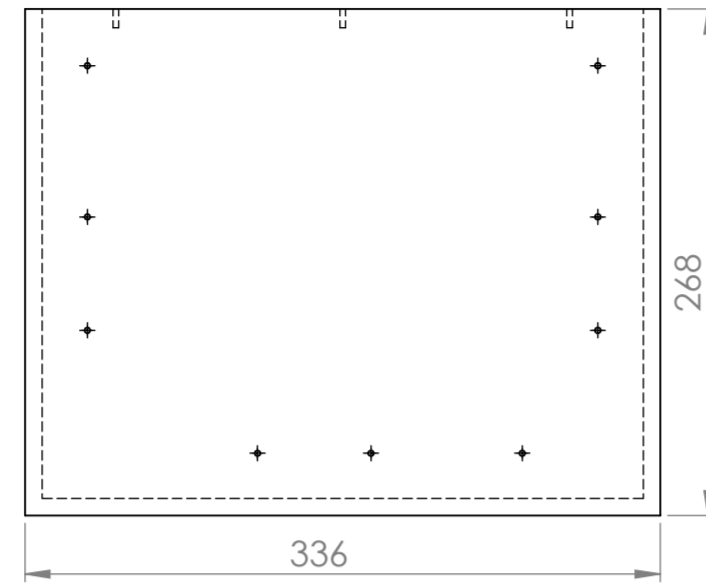
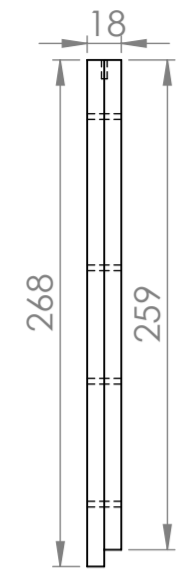


ELEMENTO  
1.2.5 L = 600 mm  
1.2.6 L = 350 mm

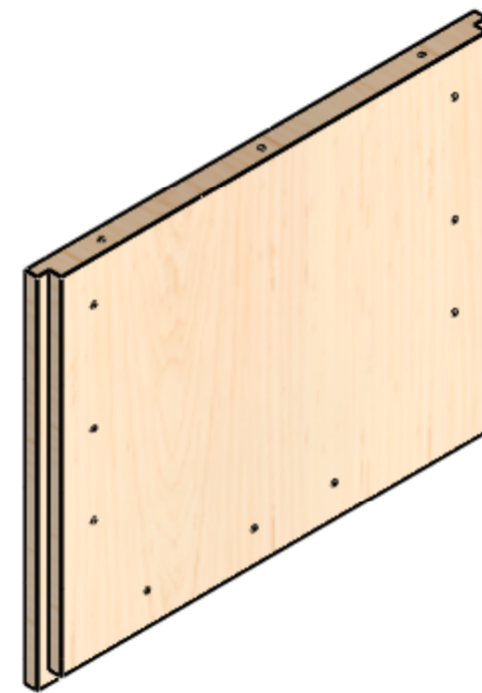
Nota: Todas las medidas estan en mm a menos que se especifique lo contrario

Marca	Nº Piezas	Designación y observaciones	Norma	Material y Medidas	Peso (g)
		Fecha	Firma	Tol. no indicadas UNE EN 22768-m	
Dibujado		04/09/12	Eduardo Vélez		Escala x:x
Revisado		04/09/12	Antonio Bula		
Aprobado		04/09/12	Fábian Amaya		
Conjunto Detalles Sistema 1.1				<b>EdiSost</b>	
Título Equipo de medición de propiedades Térmicas				Conjunto Nº:	A4
				Plano Nº:	

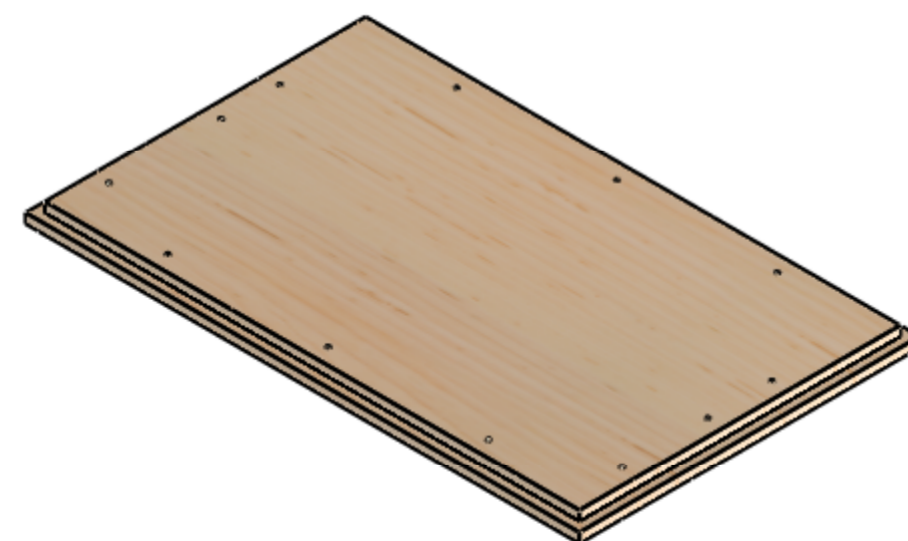
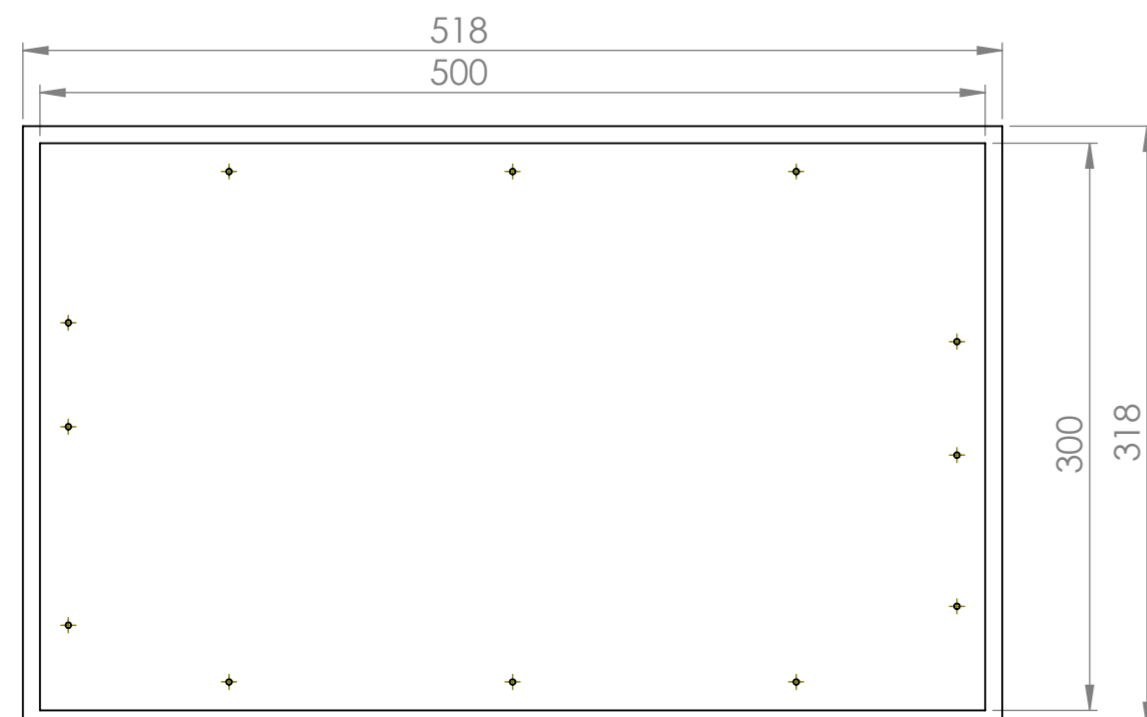
### ELEMENTO 1.1.3



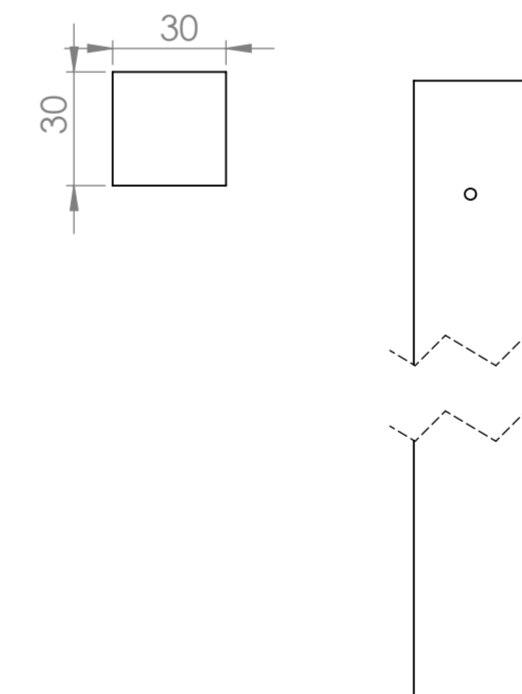
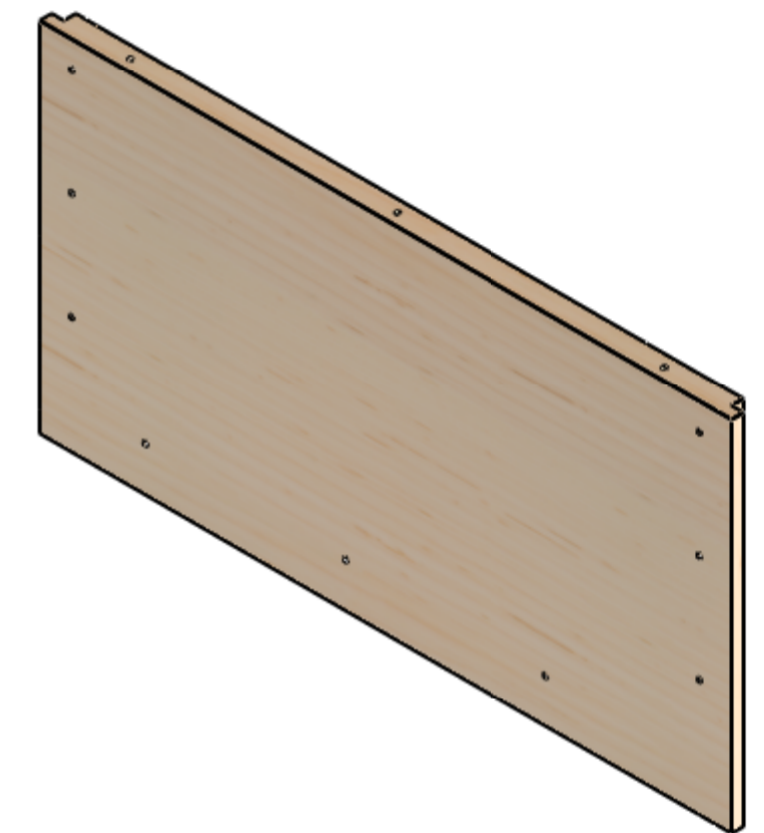
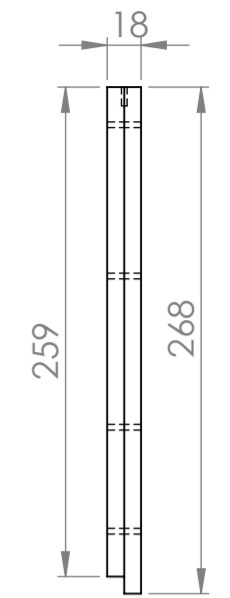
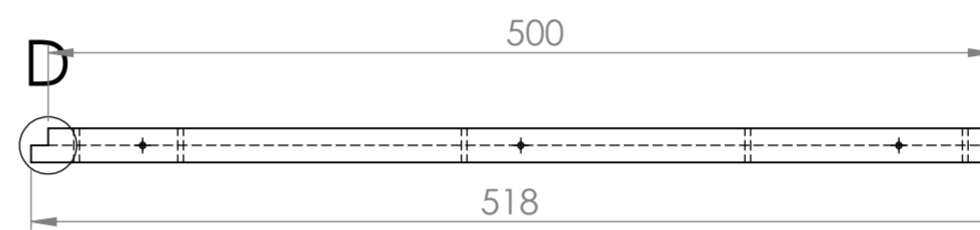
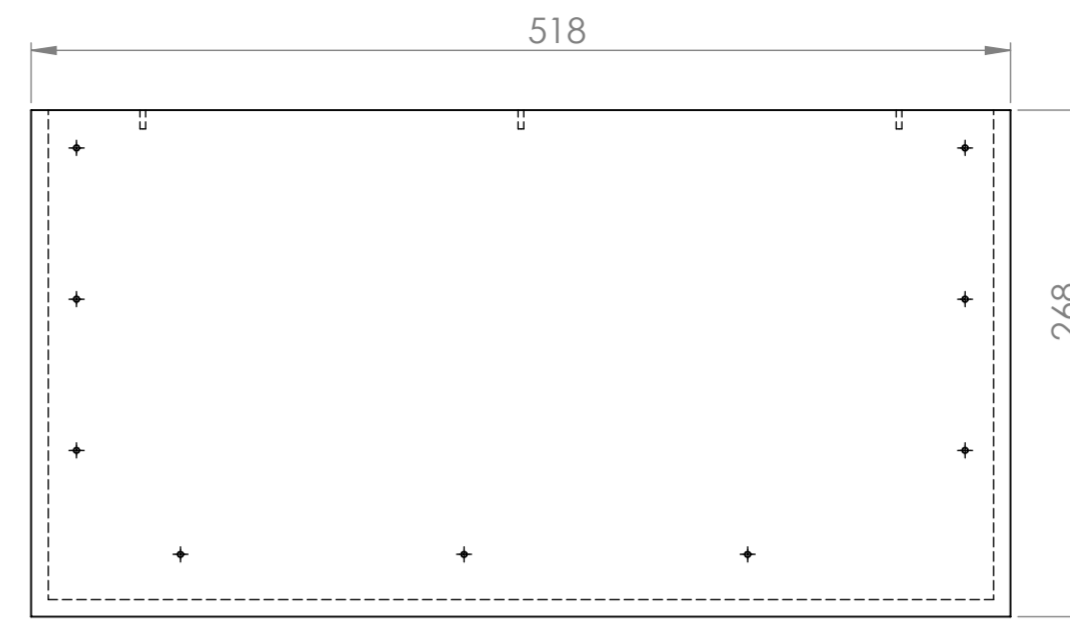
DETALLE C  
ESCALA 2 : 3



DETALLE D  
ESCALA 2 : 3

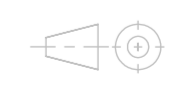


### ELEMENTO 1.1.2

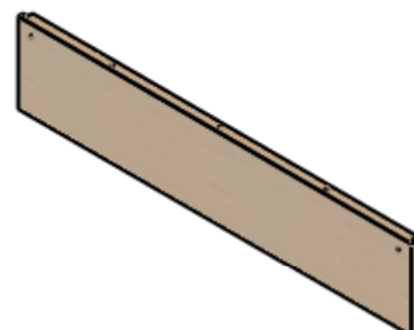
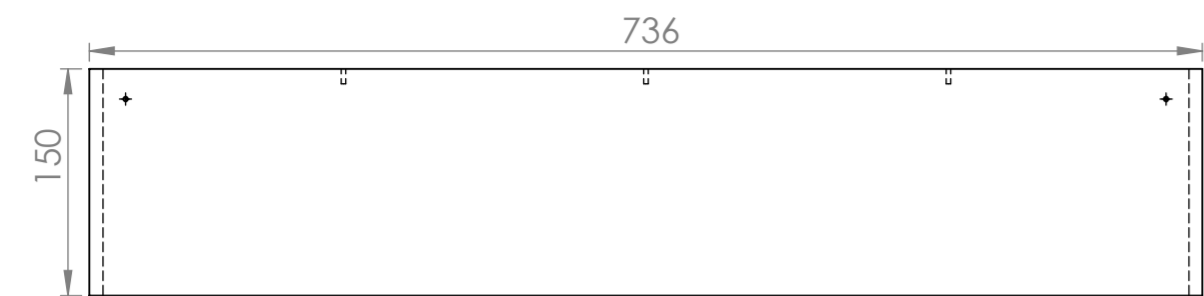


- ELEMENTO  
 1.1.4 L = 250 mm  
 1.1.5 L = 400 mm  
 1.1.6 L = 100 mm  
 1.1.7 L = 220 mm

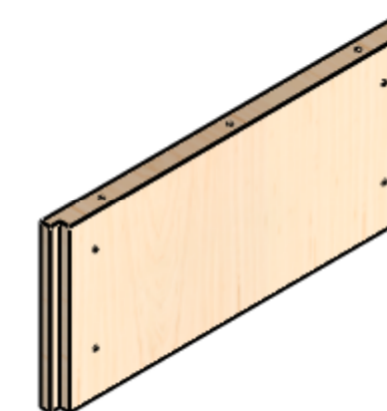
Nota: Todas las medidas estan en mm a menos que se especifique lo contrario

Marca	Nº Piezas	Designación y observaciones	Norma	Material y Medidas	Peso (g)
		Fecha	Nombre	Firma	Tol. no indicadas UNE EN 22768-m
Dibujado		04/09/12	Eduardo Vélez		 Escala x:x
Revisado		04/09/12	Antonio Bula		
Aprobado		04/09/12	Fábian Amaya		
Conjunto				<b>EdiSost</b> Conjunto N°: Plano N°:	
Detalles sistema 1.2 Titulo Equipo de medición de propiedades Térmicas					
				A4	

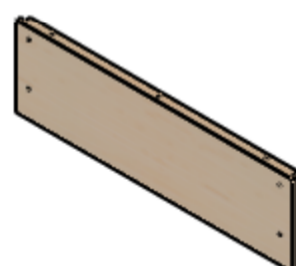
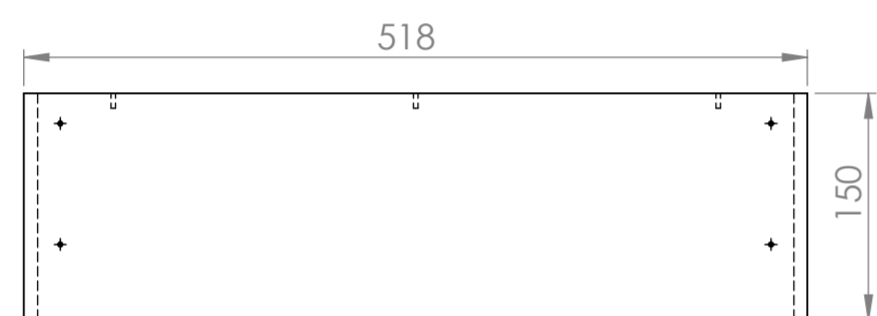
Elemento 2.3



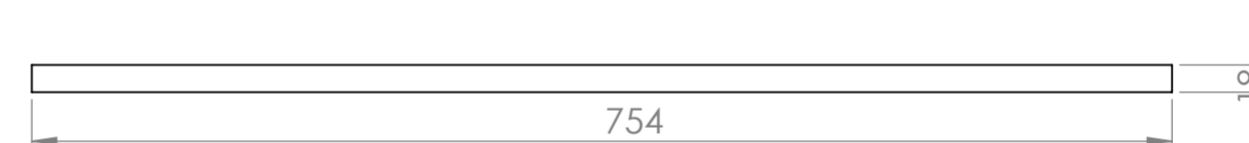
Elemento 2.2



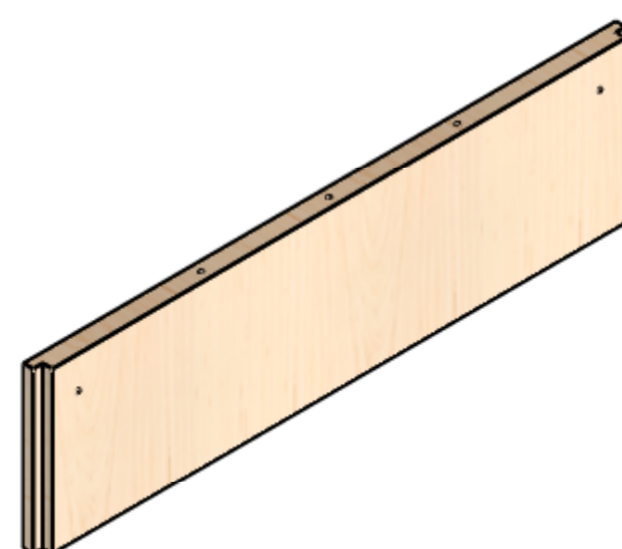
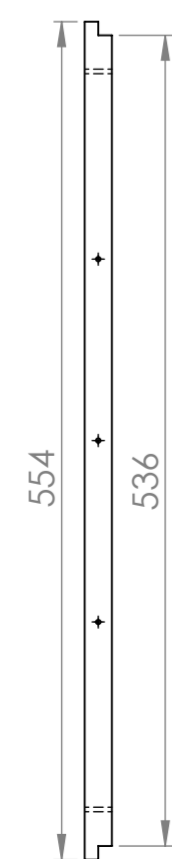
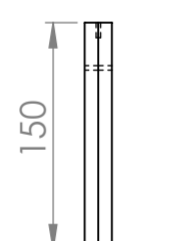
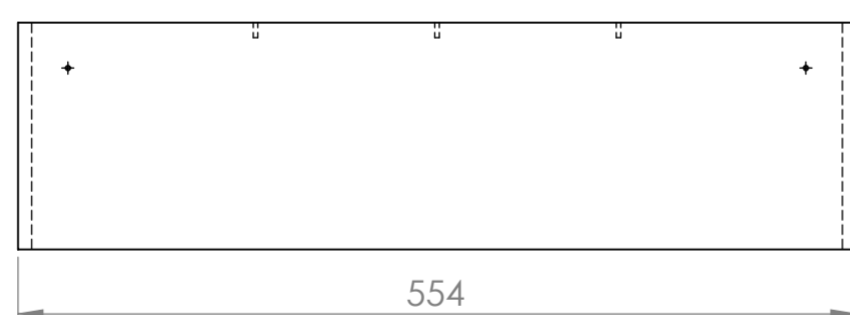
Elemento 2.1



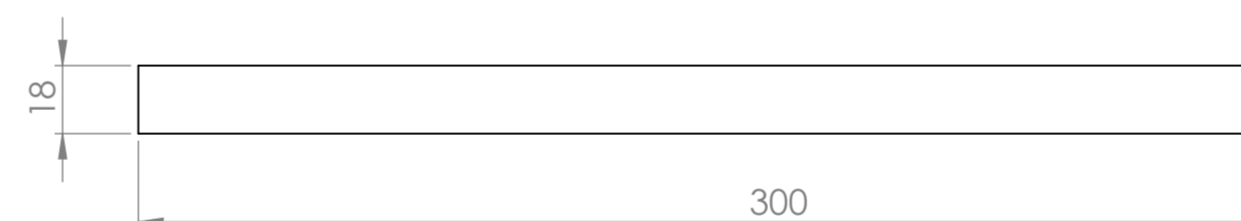
Elemento 2.5



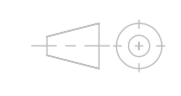
Elemento 2.4



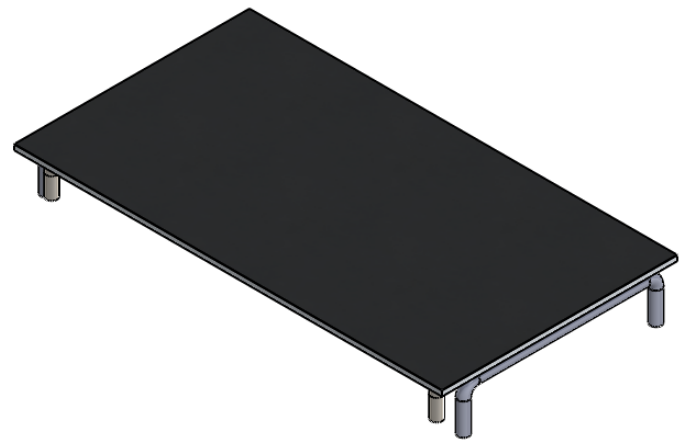
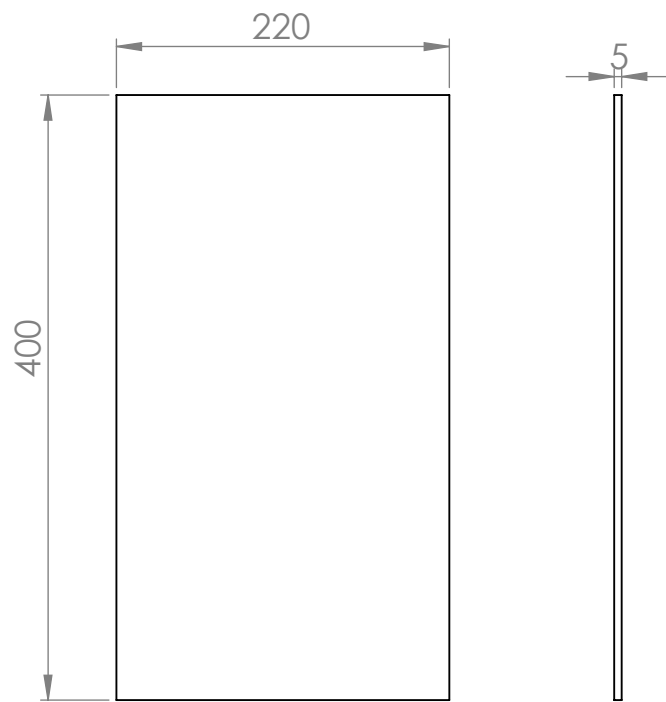
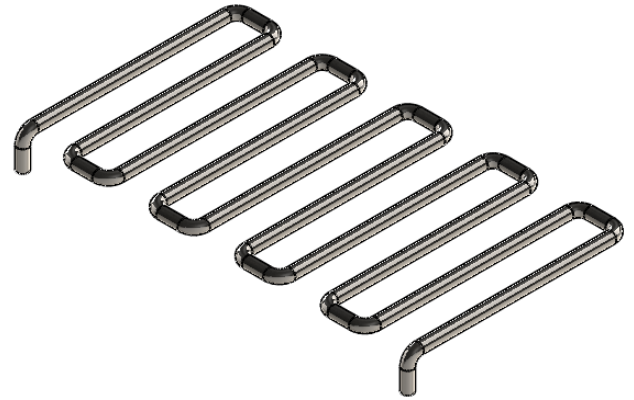
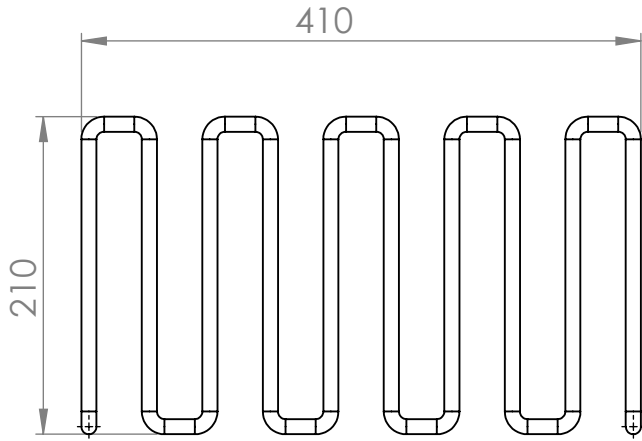
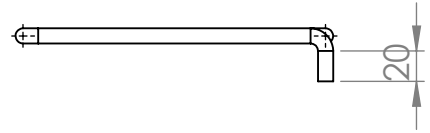
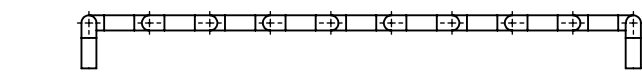
Elemento 2.6



Nota: Todas las medidas estan en mm a menos que se especifique lo contrario

Marca	Nº Piezas	Designación y observaciones	Norma	Material y Medidas	Peso (g)
		Fecha	Firma	Tol. no indicadas UNE EN 22768-m	
Dibujado		04/09/12	Eduardo Vélez		Escala
Revisado		04/09/12	Antonio Bula		x:x
Aprobado		04/09/12	Fábian Amaya		
Conjunto				<h1>EdiSost</h1>	
Detalles sistema 2					
Título				Conjunto Nº:	A4
Equipo de medición de propiedades Térmicas				Plano Nº:	

Nota: Todas las medidas estan en mm a menos que se especifique lo contrario



Marca	Nº Piezas	Designación y observaciones		Norma	Material y Medidas	Peso (g)
		Fecha	Nombre	Firma	Tol. no indicadas DIN 16901-110B	
Dibujado		04/09/12	Eduardo Eduardo			Escala x:x
Revisado		04/09/12	Antonio Bula			
Comprobado		04/09/12	Fábian Amaya			
Conjunto Resistencia eléctrica					<h1>EdiSost</h1>	
Título Equipo de medición de propiedades Térmicas					Conjunto Nº:	A4
					Plano Nº:	