

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño y construcción de un equipo de pruebas para valoración de la
respuesta térmica de paredes prefabricadas.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Bryan Alcívar Cruz

Diana Margarita Quizhpi Llaguno

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis tutores de tesis, al Ph.D Juan Peralta y Ph.D Emérita Delgado, por darme su confianza y orientación para lograr alcanzar el objetivo propuesto. A mi abuela Angela, tías Rosa y Julia por apoyarme en los primeros años de estudios en la universidad.

Bryan Alcívar Cruz

Dedico esta tesis a mis padres, Wilson y Diana, por estar conmigo y apoyarme a lo largo de todo este camino. Por su esfuerzo arduo y comprensión hasta verme cumplir mi objetivo. A mis tutores de tesis, Ph.D Juan Peralta y Ph.D Emérita Delgado, por sus consejos y guías que permitieron que esto sea posible.

Diana Quizhpi Llaguno

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento de todo corazón a Dios por permitirme vivir. A mis padres Gabriel y Sandra que supieron guiarme y ayudarme para alcanzar la meta. A mis amigos Julio, Daniel, Paula, Kevin y otros, por su apoyo incondicional en cada jornada de estudios. A la universidad y sus docentes. A los miembros del club Robota por compartir conocimientos y momentos de alegría.

Bryan Alcívar Cruz

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a Dios por haberme permitido llegar hasta aquí junto a mi familia. Agradezco a los amigos que estuvieron antes de iniciar esta carrera, Kelly y Luis Eduardo, por seguir apoyándome hasta el día de hoy. A las personas que iniciaron junto a mí en un paralelo llamado Ingeniería 5, por acompañarme dentro y fuera de las aulas hasta compartir la dicha de ser ingenieros.

A los amigos que conocí durante el recorrido, Ing. José Reinoso y Manfred, por su apoyo incondicional en los momentos difíciles. A los miembros del club Robota por mostrarme lo que es dedicación y trabajo en equipo. A mi compañero de tesis, Bryan, por su paciencia, comprensión y compromiso para lograr culminar este proyecto. A la universidad y sus docentes.

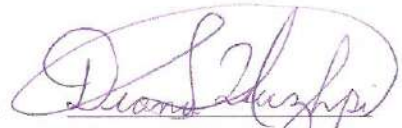
Diana Quizhpi Llaguno

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Bryan Alcívar Cruz* y *Diana Margarita Quizhpi Llaguno* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Bryan Alcívar Cruz



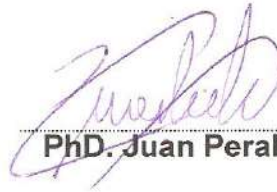
Diana Quizhpi Llaguno

EVALUADORES



PhD. Emerita Delgado Plaza

PROFESOR DE LA MATERIA



PhD. Juan Peralta Jaramillo

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La fabricación de paredes prefabricadas a nivel nacional ha ido en aumento por su fácil construcción y bajo presupuesto, tienen una propiedad que mejora el confort de los hogares debido a que tienen una baja conductividad térmica, el cual está en función del espesor. Pero en Ecuador no hay un equipo que esté bajo una normativa que determine dicha propiedad térmica, como no existe información acerca de los materiales que se fabrican y usan en el país, por lo general se emplean datos obtenidos en otros países, lo cual produce un cálculo equivocado en la conductividad térmica. El presente trabajo tiene como objetivo el de diseñar un equipo de pruebas para obtener datos de resistencia térmica reales y aplicarlo en la fabricación de las paredes prefabricadas, para lograrlo se usó la norma ASTM C-177, el cual indicó que el equipo APCG debe tener una placa caliente y placa fría, ambas hechas de aluminio, y entre ellas, se colocó la muestra, de área y espesor conocida, donde se adquirió las temperaturas superficiales de ambas caras para determinar la conductividad térmica usando la ley de Fourier de conducción de calor. Los resultados obtenidos de conductividad térmica del material dado por el cliente fueron de $0,027 \text{ W/mK}$, con un gradiente de temperatura promedio de $40,56^\circ\text{C}$. Las simulaciones estructurales y pruebas realizadas muestran que el equipo cumple con los parámetros dados por la norma y los resultados obtenidos no superan el 10% de error con los datos dados por el fabricante de la muestra.

Palabras Clave: Conductividad térmica, Pared prefabricada, APCG, ASTM

ABSTRACT

The manufacture of prefabricated walls at the national level has been increasing because of its easy construction and low budget, have a property that improves the comfort of homes because they have a low thermal conductivity, which is a function of thickness. But in Ecuador, there isn't equipment that is under a regulation that determines such thermal property, as there isn't information about the materials that manufactured and used in the country, usually using data obtained in other countries, which produces a miscalculation in thermal conductivity. The objective of this work to design a test equipment to obtain real thermal resistance data and apply it in the fabrication of prefabricated walls. To achieve this, ASTM C-177 was used, which indicated that the APCG equipment should have a hot plate and cold plate, both made of aluminum, and between them, the sample, of known area and thickness, was placed where the surface temperatures of both faces were acquired to determine the thermal conductivity using the Fourier law of heat conduction. The results obtained of thermal conductivity of the material given by the client were 0,027 W/mK, with an average temperature gradient of 40.56°C. The structural simulation and tests carried out show that the equipment complies with the parameters given by the standard and the results obtained do not exceed 10% error with the data given by the sample manufacturer.

Keywords: Thermal conductivity, Prefabricated wall, APCG, ASTM

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE PLANOS	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Definición del Problema.....	1
1.2 Justificación del proyecto	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Paneles prefabricados de producción nacional.....	3
1.4.2 Conductividad Térmica	5
1.4.3 Medidores de conductividad térmica.....	7
1.4.4 Aparato de placa caliente con guarda (APCG).	8
CAPÍTULO 2.....	11
2. Metodología	11
2.1 Alternativas de diseño para el APCG.	11
2.1.1 Modelo 1.	11
2.1.2 Modelo 2.	12
2.1.3 Modelo 3	12
2.2 Selección del diseño para el APCG.....	13
2.3 Criterios generales de diseño dados por el cliente.	15
2.4 Norma ASTM C 177.	16
2.5 Diseño Conceptual del equipo APCG.....	16
2.5.1 Muestra.....	16

2.5.2	Placa caliente.....	17
2.5.3	Placa de guarda.....	18
2.5.4	Placa fría.....	19
2.5.5	Mecanismo de movimiento – Tornillo de potencia	20
2.5.6	Sistema de calentamiento para placas.	21
2.5.7	Sistema de enfriamiento para placas.....	21
2.5.8	Sistema de adquisición de datos	22
CAPÍTULO 3.....		26
3.	Resultados y análisis	26
3.1	Diseño del Equipo de Placa Caliente con Guarda - APCG.	26
3.1.1	Estructura del equipo	26
3.1.2	Tornillo de potencia.....	27
3.1.3	Elementos del equipo APCG.	28
3.1.4	Sistema de adquisición de datos	31
3.2	Análisis de deformaciones del equipo APCG.	34
3.3	Análisis térmico del equipo APCG.....	36
3.3.1	Resistencia eléctrica	36
3.3.2	Paredes aislantes	37
3.4	Resultados de conductividad térmica medidos.	39
3.5	Análisis de costo.....	40
CAPÍTULO 4.....		43
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	43
4.1	Conclusiones.....	43
4.2	Recomendaciones.....	44
BIBLIOGRAFÍA.....		47
APÉNDICES.....		51

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
APCG	Aparato de Placa Caliente con Guarda
PIR	Polisocianurato
CAD	Computer Aided Design
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ISO	International Organization for Standardization

SIMBOLOGÍA

mm	Milímetro
m	Metro
W	Watts
°C	Celsius
V	Voltio
A	Amperio
K	Kelvin
Kg	Kilogramo
Pulg	Pulgada
M	Métrica
s	Segundo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Vista general de los componentes mecánicos del aparato de placa caliente con guarda. [28].	9
Figura 2.1 Diseño de forma inicial del APCG simple con un tornillo de potencia. Mecanismo de movimiento por tornillo de potencia con manivela.	15
Figura 2.2 Placa caliente del APCG simple.	18
Figura 2.3 Guarda del APCG simple.	19
Figura 2.4 Placa fría del APCG simple, con mecanizado de la tubería de cobre.	20
Figura 2.5 Tornillo de potencia con palanca de desplazamiento.	21
Figura 2.6 Algoritmo de funcionamiento del equipo APCG	23
Figura 3.1 Vista del equipo final APCG	26
Figura 3.2 Vista de la estructura del equipo APCG.	27
Figura 3.3 Vista de la estructura con el tornillo de potencia.	28
Figura 3.4 Vista final de la placa caliente y placa de guarda.	29
Figura 3.5 Acoplamiento de la resistencia térmica en la placa caliente con la placa de guarda.	30
Figura 3.6 Vista final de la placa fría.	30
Figura 3.7 Vista interior de la Placa Fría con el intercambiador de calor.	31
Figura 3.8 Diagrama esquemático de conexiones.	32
Figura 3.9 Ubicación de los sensores de temperatura en la placa caliente.	33
Figura 3.10 Ubicación de los sensores de temperatura en la guarda.	33
Figura 3.11 Ubicación de los sensores de temperatura en la placa fría.	34
Figura 3.12 Simulación de deflexión plástica del equipo final APCG.	35
Figura 3.13 Simulación del Factor de Seguridad del equipo final APCG.	36
Figura 3.14 Simulación Térmica de la Resistencia Eléctrica.	37
Figura 3.15 Simulación Térmica de las Paredes Aislantes.	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de paneles prefabricados. [17]	5
Tabla 2.1 Matriz de decisión del prototipo.	14
Tabla 2.2 Características técnicas de la muestra.	17
Tabla 2.3 Elementos del sistema de enfriamiento.	22
Tabla 2.4 Elementos del sistema de adquisición de datos.	22
Tabla 2.5 Características técnicas de los sensores DS18B20. [34]	24
Tabla 2.6 Límites de error para diferentes tipos de termocuplas. [35].....	24
Tabla 3.1 Elementos estructura del equipo APCG.	27
Tabla 3.2 Componentes del equipo APCG.....	29
Tabla 3.3. Valores obtenidos de conductividad térmica para la muestra de panel prefabricado.....	39
Tabla 3.4 Presupuesto para la construcción del equipo APCG.	40
Tabla 3.5 Presupuesto para el costo hora hombre del equipo APCG.	42

ÍNDICE DE PLANOS

Plano A.1 Planos Generales del APCG con Tornillo de Potencia.	53
Plano A.2 Plano de Placa Caliente y Placa de Guarda.	54
Plano A.3 Plano de Placa Fría.....	55
Plano A.4 Dimensionamiento de la Placa Caliente, Placa Fría y Tubería de Cobre..	56
Plano A.5 Plano de la estructura del APCG.	57
Plano A.6 Dimensionamiento de la estructura APCG.....	58

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La elaboración de paredes prefabricadas en el Ecuador ha ido en aumento en estos últimos años, por su fácil construcción y bajo presupuesto; y para la fabricación de las paredes se tiene que tomar en cuenta la conductividad térmica de los materiales, porque es una de las propiedades termo físicas más importantes al momento de escoger el material más adecuado para construir una pared o edificaciones que nos dé un aislamiento térmico con la finalidad de ahorrar material y el uso eficiente de la energía. Debido a que en el Ecuador no existe un equipo adecuado que mida la propiedad anteriormente mencionada, existe un déficit en el proceso de manufactura, porque se toma en cuenta tablas de conductividad térmica de materiales que ya están establecidas en otras localizaciones de América, lo cual produce dos posibles errores; el primero, el sobredimensionamiento del espesor de la pared, y el segundo, de no satisfacer el aislamiento térmico deseado. Considerando este problema, el proyecto tiene como fin de mejorar la fabricación de las paredes prefabricadas, realizando un ensayo de conductividad térmica de los materiales usados nacionalmente en estas paredes, y de otros materiales que posiblemente se puedan usar, contribuyendo a la industria con datos reales de esta propiedad, para disminuir las pérdidas de material y ahorro energético del país.

1.1 Definición del Problema

En el país no existe suficiente información referencial a las propiedades térmicas de los materiales que pueden ser empleados en la construcción de paredes prefabricadas. En la práctica, se asume que los materiales que existen en el país tienen similares propiedades a los materiales fabricados en países desarrollados, sin considerar la variación de la composición de las materias primas y sus procesos de fabricación. Dicho esto, se puede entender que existe la necesidad de analizar las muestras de fabricación nacional, evaluando la respuesta térmica de las mismas, al determinar la conductividad térmica del panel cuando este es sometido a condiciones ambientales similares a las encontradas en el país. En esta perspectiva nuestro trabajo plantea la norma ASTM C-177 como método de prueba para la determinación de las propiedades.

Adicional a esto, los equipos y sistemas existentes en el país que pueden realizar este tipo de análisis poseen limitantes que impiden realizar mediciones para un objetivo en específico. Entre estas restricciones está el manejo limitado del espesor de medición, para el cual no puede ser considerado como muestra un panel prefabricado de tipo comercial. Partiendo de esa limitante se procede a diseñar un equipo de prueba que permita analizar los paneles prefabricados dentro de un rango de espesor definido. Se opta por la construcción de un aparato de guarda caliente (APCG) basado en la norma ASTM C-177.

1.2 Justificación del proyecto

Al momento de seleccionar los materiales para la construcción de una infraestructura (edificios, plantas industriales, sistemas que utilizan energía) se emplean valores experimentales y teóricos de conductividad térmica para realizar la simulación de cargas térmicas con el fin de optimizar o mejorar los diseños estructurales desde el punto de vista del confort o ahorro energético.

Actualmente, no existen suficiente información acerca de los materiales que se fabrican y usan en el país, por lo que las simulaciones emplean datos obtenidos en otros países que, en su mayoría no corresponden a los materiales usados nacionalmente, ni en proceso de construcción o de composición.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un equipo de pruebas para la valoración de materiales empleados en paredes prefabricadas con la finalidad de obtener datos de resistencia térmica reales y aplicarlos en el cálculo de cargas térmicas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar el diseño estructural y constructivo del prototipo de prueba empleando un software CAD con el fin de visualizar las características de construcción del equipo.

- Estimar la potencia de la resistencia a implementarse en las paredes de la estructura como mecanismo de fuente de calor.
- Realizar un análisis de eficiencia energética, tomando en cuenta la corriente y el voltaje dado al sistema.

1.4 Marco teórico

Desde el 2015 las empresas constructoras han empezado a ofrecer viviendas industrializadas, es decir que emplean paneles prefabricados junto con otras piezas estructurales que salen de fábrica listas para su montaje.[1]

De manera paralela las constructoras buscan desarrollar la construcción sustentable, que no afecte al medio ambiente durante la edificación y que a su vez pueda ser más duradera, confortable y con el menor gasto económico.[2] Esto se logra con la elaboración de paneles prefabricados, cuyas variantes dentro de su composición actúan sobre las propiedades mecánicas y térmicas únicas en cada producto.

En ciertos casos se menciona que poseen propiedades térmicas para evitar calor o frío intenso en los interiores. [3] Sin embargo, se desconoce si los valores de conductividad térmica fueron medidos experimentalmente o estimados, en otros casos ni siquiera se cuenta con dicho valor.

1.4.1 Paneles prefabricados de producción nacional.

La industria de la construcción se ha mantenido en avance conforme con las necesidades del usuario final. El reciente cambio que se ha producido es la transformación de la construcción tradicional por una construcción industrializada. Esto significa que las técnicas empleadas regularmente en el sector de la construcción han pasado a ser más innovadoras y automatizadas, donde los componentes estructurales se fabrican en talleres para después ser transportados y ensamblados en obra. [4]

Estos sistemas prefabricados de hormigón presentan ventajas económicas, por la reducción de tiempos durante la producción y transporte, racionalización de recursos, además de la calidad, durabilidad y adaptabilidad que ofrecen.[5]

Entre otros de los efectos positivos se encuentran los ambientales, dado que son sostenibles por la facilidad de reciclaje del producto una vez que cumpla su vida útil, la baja generación de residuos durante la producción y la posibilidad de innovar mediante la adición de materiales alternativos reciclables.[4], [5]

Ante lo mencionado se puede direccionar la construcción industrializada con sostenibilidad, y con ello colaborar para el cumplimiento de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) relacionados, como el ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructuras y el ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles.[6]–[8] Desde los países desarrollados se evidencia el deseo por innovar y desarrollar procesos constructivos más competitivos, con altos niveles de calidad y seguridad, que brinden una vivienda económica, digna y sostenible. A su vez que consideren necesidades como la mejora de la eficiencia energética, la disminución del impacto en el entorno y el reciclaje de los materiales de construcción.[9]

El sector de la construcción en Ecuador ha buscado también transformarse y renovar sus productos considerando los requerimientos económicos, sociales y ambientales. En las últimas décadas los paneles prefabricados de hormigón se han desarrollado, ya que en sus inicios fueron paneles de hormigón en masa que han continuado evolucionando hasta mejorar sus características y proceso de fabricación. Con el tiempo ha variado la tendencia por unidades de mayor tamaño, mayor variedad de formas, inclusión de aislamiento térmico y acabado interior. [10] En el mercado ecuatoriano se pueden encontrar opciones de manufactura de paneles prefabricados como:

- Panelego [3]
- Panel Sándwich [11]
- Láminas de micro hormigón HORMIPOL [12][13]
- Ecco bloque [14]

- Planchas de fibrocemento [15]
- Aislapanel. [16]

Estos productos se consideran paneles prefabricados, aunque cada uno puede presentar un tipo diferente de prefabricación junto a otras diferencias. Entre ellas están características relacionadas a su composición, uso, tamaño, forma, durabilidad, propiedades térmicas y acústicas. En la Tabla 1.1 se muestra la clasificación que se da para designar un panel prefabricado.

Tabla 1.1 Clasificación de paneles prefabricados. [17]

Clasificación según:	Panel Prefabricado
Grado de prefabricación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Total ▪ Parcial
Uso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Resistente ▪ Cerramiento ▪ Ornamental
Tamaño	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Liviano ▪ Pesado
Forma	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lineales ▪ Bloques ▪ Superficiales
Grado de tipificación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Normalizados (Perfiles de acero) ▪ Tipificados (Viguetas pretensadas para entrepisos) ▪ Individuales (Vigas individuales)
Método de ejecución	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Industrial a gran escala ▪ En Taller ▪ Artesanal

1.4.2 Conductividad Térmica

Es una propiedad termo física de transporte propia de los sólidos, aunque también se puede suponer que tiene lugar para los fluidos en reposo. Indica la velocidad con que fluye calor dentro y a través de un material mediante el proceso de difusión, dependiendo de la estructura física del material y estado de la materia. Se puede medir en vatios por metro cuadrado de superficie para un gradiente de

temperatura de 1 K por unidad de espesor de 1 m, es decir en Watts sobre metro-Kelvin (W/mK).

Todos los materiales tienen comportamientos distintos frente al calor, y esto se debe a las propiedades térmicas que posean. Los materiales unidos por enlaces metálicos (metales) poseen en general alta conductividad térmica, mientras que los materiales unidos por enlaces iónicos o covalentes (cerámicos y plásticos) tienen una conductividad pobre.[18] Existen grandes diferencias en las conductividades térmicas internas, por lo que una aleación de diferentes elementos presenta variantes significativas en la conductividad térmica en relación con su composición.

La ley de Fourier relaciona el transporte de energía por conducción:

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (1.1)$$

Señalando que la densidad de flujo de calor (q), es directamente proporcional al gradiente de temperatura (T) y de sentido contrario. Es decir, el calor fluye de una temperatura alta a otra de temperatura baja. La constante de proporcionalidad (k) entre (q) y (∇T) se denomina conductividad térmica.[19]

Por lo general hay casos donde haya un flujo de energía de estado estacionario (estable) donde sus propiedades no cambian con el tiempo; y otros casos donde sea de estado transitorio (cambian a través del tiempo). Por la ley de Fourier, en una placa plana, se relacionan la conductividad térmica con el flujo de calor Q , el cual fluye por una determinada área y espesor de un cuerpo, que se encuentra con una diferencia de temperaturas entre ambas caras de la placa.

Para poder obtener la conductividad térmica del material, la cual se considera constante, por la ley anteriormente mencionada, se debe garantizar que la muestra esté en un régimen estacionario, sea simétrica y, además, que exista un

flujo de calor unidimensional; es decir que tenga una sola dirección y sea perpendicular al área de medición.

1.4.3 Medidores de conductividad térmica.

El coeficiente de conductividad térmica indica la capacidad de un material para transferir energía a través del mismo al producirse una diferencia de temperatura. Este coeficiente se determina como el flujo de calor (W/m) debido a un gradiente de temperatura (K). Los principales parámetros que afectan a la conductividad térmica son la densidad del material, la humedad del material y la temperatura ambiente. Al aumentar cualquiera de estos factores, la conductividad térmica también aumenta. [19][20]

Dependiendo del tipo de material y el estado de la materia en que se encuentre la muestra o espécimen, resulta conveniente usar un determinado tipo de medidor de conductividad térmica según lo indique una norma de referencia. La ASTM en el Volumen 04.06: Thermal Insulation; Building and Environmental Acoustics - señala los métodos, procedimientos y equipos regulados para la medición de conductividad térmica considerando si se trata de Materiales sólidos aislantes, Materiales empleados en la construcción, Sólidos conductores metálicos, Fluidos simples o Fluidos complejos. [21]

Entre los métodos de caracterización de conductividad térmica en régimen estacionario, que permitan obtener resultados de manera confiable y repetible están “el método de la placa caliente guardada” y “el método del medidor de flujo de calor”. Siendo el primero el método por el que se obtiene una exactitud de menor medida.[22][23] En este caso se diseña para una muestra de panel prefabricado de hormigón, por lo que se trata de un material sólido aislante y el tipo de equipo propuesto y aceptado por la ASTM es un aparato de placa caliente con guarda.

Los instrumentos de medición de conductividad térmica ofertados en el mercado varían de acuerdo al modelo, la norma bajo la cual se rigen, la incertidumbre de

las mediciones, el rango de temperaturas y conductividad sobre el que opera, el tamaño y espesor de la muestra. [24] Se puede observar que a pesar de la variedad que se ofrece, aún pueden existir limitantes relacionadas con el espesor del material e incluso con el costo del equipo.[25]

Entre las características o requerimientos a considerar para un equipo de medición de conductividad térmica resaltan: [20]

- Modelo
- Normativa de referencia
- Rango de temperatura de las placas
- Dimensiones de la muestra: Largo, Ancho, Grosor.
- Rango de conductividad térmica

Además, se observa que los equipos existentes operan cumpliendo con las normas:

- C 518 –Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus.
- ISO 8301 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus.

1.4.4 Aparato de placa caliente con guarda (APCG).

El APCG es un instrumento primario para estimar la conductividad y resistencia térmica de materiales aislantes, usando la técnica de transferencia de calor por conducción en estado permanente.[26] [27] Su principio de operación y procedimientos de prueba se pueden hallar en la norma ASTM C177.



Figura 1.1 Vista general de los componentes mecánicos del aparato de placa caliente con guarda. [28]

El APCG está compuesto por una unidad de superficie isotérmica caliente (Placa caliente) y dos unidades de superficies isotérmicas frías (Placas frías). La unidad de superficie isotérmica caliente se compone por dos secciones concéntricas, una de medición y la guarda como aislamiento, ambas fabricadas en un material conductor. Las unidades de superficies isotérmicas frías están compuestas por una placa superior y una inferior, las cuales funcionan como sumideros del flujo de calor. Estas placas suelen ser fabricadas de modo que permitan el flujo de refrigerante.[29][30] Se emplean también instrumentos de medición y control como: sensores de temperatura, fuentes de potencia, controles de temperatura y de potencia.[31][32]

El espécimen o material a ser medido se ubica entre la placa caliente y las placas frías, por lo que se requieren dos muestras. Sin embargo, en la norma ASTM C 177 indica que el método puede ser aplicado para aparatos con lado simple o con lado doble, con dirección del flujo de calor ya sea vertical u horizontal.

El fundamento del método se basa en producir un flujo térmico constante a la muestra al suministrar energía al área de medición mediante una fuente de poder (flujo de calor por unidad de tiempo). Para así generar un gradiente térmico entre las caras de la muestra, en función de la potencia otorgada a la placa caliente. Mientras que la guarda proporciona la energía necesaria para generar las condiciones de flujo de calor radial al área de medición al mantener la misma temperatura que el área de medición. Esto evita las pérdidas de calor en la placa de medición, obligando a que el flujo de calor se mantenga perpendicular a superficie de medición.[29]

Se traza la curva de variación del coeficiente de conductividad térmica en función de la temperatura media de las probetas y se determina el coeficiente de conductividad térmica a una temperatura media deseada.[22] Dicho coeficiente es representado como la constante positiva λ en la expresión de la Ley de Fourier de conducción de calor:

$$\vec{q} = -\frac{\lambda A \Delta T}{L} \quad (1.2)$$

donde q es el flujo de calor, A el área transversal, L el espesor del espécimen en la dirección de flujo de calor y ΔT es la diferencia de temperatura a la que se somete el espécimen (Temperatura de placa caliente y fría).[31]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En esta sección se indica el proceso para el diseño y construcción del APCG, describiendo los elementos mecánicos que lo componen junto con sus características tomando como referencia la norma ASTM C 177.

2.1 Alternativas de diseño para el APCG.

Para realizar el diseño del equipo de medición de conductividad térmica para paneles prefabricados de producción nacional, se considerando los criterios y requerimientos establecidos en la norma ASTM C 177.

Es importante mencionar, la creación de varias alternativas de diseño para el equipo se dio con el objetivo de seleccionar el mejor mecanismo que permita abaratar los costos de construcción, optimizar la cantidad necesaria de sensores de temperatura, y además que sea un equipo de fácil manejo; y transporte debido a que con algunos casos será necesario llevar el equipo a los laboratorios para realizar los respectivos análisis de la muestra.

A partir de lo anteriormente señalado se propuso tres diseños de APCG¹, donde se analizó el sistema de movimiento de las placas sean de forma manual, o motorizado; y la cantidad de placas frías. Para todos los diseños planteados se consideró el aluminio y cobre para las placas por su conductividad térmica, entre otros aspectos.

2.1.1 Modelo 1.

Para este diseño se propuso un equipo con tres placas de aluminio fundido que se encuentran de manera horizontal para hacer un ensayo de flujo de calor vertical. La placa caliente, ubicada en el centro del equipo, tiene en su interior una resistencia térmica hecha de cerámico, la cual cumplirá como fuente de calor de equipo; y dos placas frías, ubicados en la parte superior e inferior de la placa

¹ APCG: Aparato de Placa Caliente con Guarda

caliente. Estas placas frías cuentan en su interior un tubo de cobre, el cual cumplirá el objetivo de mantener las placas a una temperatura menor y constante que la placa caliente. El movimiento de las placas frías se hará con un sistema de 4 tornillos de potencia que se tendrán que mover simultáneamente para mantener las placas frías paralelas.

2.1.2 Modelo 2.

Esta propuesta se basa en un sistema simple, que posee una placa caliente y una placa fría. La placa caliente se encuentra ubicada en la parte inferior del equipo, la cual está compuesta por una placa de aluminio; y tiene una resistencia eléctrica circular que sirve como fuente de calor para el equipo. La placa fría de igual forma está compuesta por dos placas de aluminio y entre ellas un tubo de cobre que permite la circulación de agua o algún refrigerante al sistema para mantener una temperatura baja y constante. El mecanismo de movimiento de las placas es mediante 4 tornillos de potencia similar a la primera alternativa, debido a su fácil construcción y estabilidad, el mismo que puede ser manual o con motores.

2.1.3 Modelo 3

Se basa en un sistema simple, igual al modelo 2, con dos diferencias, la placa caliente tiene una resistencia eléctrica circular plana del mismo diámetro. Y el mecanismo de movimiento de la placa fría se realiza por un tornillo de potencia ubicada en el centro de la de la placa, y posee 4 ejes lisos que funcionan como guía del desplazamiento.

Por otro lado, también se analizó el sistema de movimiento de las placas del APCG, que se detallan a continuación.

- Mecanismo 1: Sistema de movimiento manual por transmisión de engranes. Este sistema cuenta con cuatro tornillos de potencia, para los cuales se diseña un sistema de transmisión por engranes. El mismo que se ubica en la zona superior del equipo para asegurar el avance y retroceso de las placas. Esto significaría instalar dos sistemas de movimiento donde cada uno varía la posición vertical de

las placas mediante una manivela cuya rotación se expresa en el avance de los tornillos.

- Mecanismo 2: Sistema de movimiento mecánico con motores de paso. El sistema se compone por cuatro tornillos de potencia que atraviesan las placas, y se encuentran conectados cada uno a un servomotor. Este diseño permite asegurar la planicidad y distancia entre placas.
- Mecanismo 3: Sistema de movimiento manual por un tornillo de potencia. Este sistema cuenta con un solo tornillo de potencia, el cual estará sujeto a la placa fría y en la parte superior del equipo se encuentra una tuerca que posee una manivela que nos ayuda al desplazamiento de la placa fría hacia arriba o abajo.

2.2 Selección del diseño para el APCG.

Para la elección de un prototipo adecuado se consideraron las siguientes características:

- a) Ensamblaje: Consiste en el montaje o desmontaje del equipo para la fabricación del APCG. Se ha dado una ponderación del 25%
- b) Mantenibilidad: Capacidad para reparar o restaurar un elemento con facilidad a fin de que continúe cumpliendo la función requerida, se obtuvo un 25%.
- c) Maniobrabilidad: Facilidad para movilizar y operar el equipo al momento de realizar una prueba, en cualquier industria que sea requerida. Se obtuvo un 15%.
- d) Costo: Es la característica más importante porque esto determinará qué tan accesible se haga el equipo para futuras aplicaciones, se determinó un valor de 35%.

Se determinaron rangos para la ponderación de cada característica anteriormente mencionada para escoger el modelo y el mecanismo que satisfaga cada criterio. El rango comprende desde 1 hasta el 10, donde el 1 indica no satisface y 10 satisface totalmente. Al final se suman los productos entre cada ponderación y rango.

Tabla 2.1 Matriz de decisión del prototipo.

Fuente: [Elaboración Propia]

ALTERNATIVAS	CRITERIOS				PUNTAJE
	0,25 a	0,25 b	0,15 c	0,35 d	
APCG con doble cara con tornillos de potencia de soporte.	7	7	6	7	6,85
APCG de simple cara con tornillos de potencia de soporte.	9	8	8	9	8,60
APCG de simple cara con un tornillo de potencia	10	9	9	10	9,60
MECANISMO					
Sistema de movimiento manual por transmisión de engranes.	8	7	8	8	7,75
Sistema de movimiento mecánico con motores de paso.	9	8	8	7	7,9
Sistema de movimiento manual por un tornillo de potencia con manivela	9	9	9	10	9,35

Con la puntuación de 9,60; el prototipo a diseñar fue el APCG con área de medición simple y con un tornillo de potencia, y con 9,35; el movimiento de las placas será con un tornillo de potencia con manivela; este cumple con mayor seguridad los requerimientos.

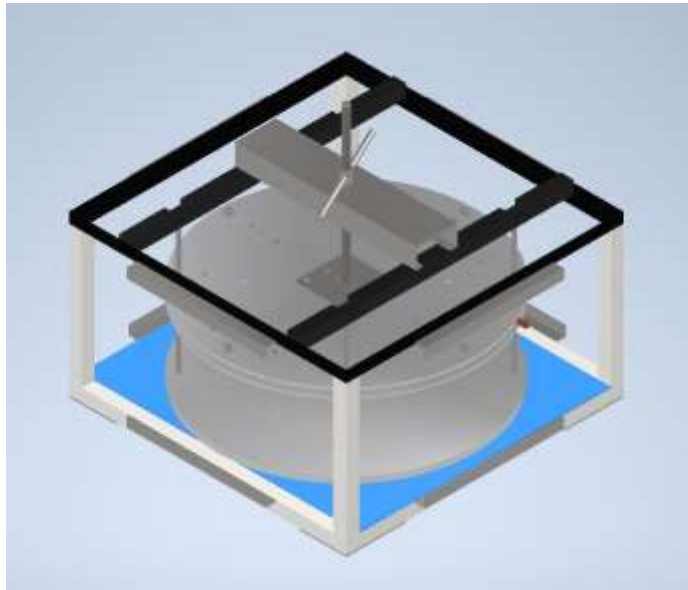


Figura 2.1 Diseño de forma inicial del APCG simple con un tornillo de potencia. Mecanismo de movimiento por tornillo de potencia con manivela.

Fuente: [Elaboración propia]

La figura 2.1 describe el modelo tentativo del prototipo a fabricar, definido mediante la matriz de decisión. Se observa el dimensionamiento de la estructura con la ubicación de los ejes guía entre la placa fría y la placa caliente. Así como el sistema de movimiento mediante el tornillo de potencia con manivela.

2.3 Criterios generales de diseño dados por el cliente.

Como punto de partida considerando algunos criterios para el diseño del APCG, con la finalidad de asegurar un correcto y eficiente funcionamiento del equipo. Estos criterios fueron:

1. Los principales tipos de muestras a analizar son paneles prefabricados con espesores que van desde los 60 a 120 mm.
2. El rango de temperatura de operación del equipo debe ser de 0-90 °C.
3. El material a emplear para las placas frías y la placa caliente debe ser aluminio o cobre.
4. El equipo debe ser de fácil transportación, con un peso no mayor a 50 Kg.
5. El tamaño de la superficie superior del equipo no debe exceder las dimensiones de 600 x 600 mm.

2.4 Norma ASTM C 177.

El equipo de medición APCG debe de cumplir con los siguientes requerimientos señalados por la norma ASTM C 177:

1. Se realizan las pruebas en los materiales que no superen los 16 W/mK.
2. Los ensayos se pueden realizar manteniendo el flujo de calor ya sea horizontal, o vertical.
3. La diferencia de temperatura entre las placas no debe ser menor al rango que comprende entre 10-20 K.
4. Mantener temperaturas constantes de las dos placas, la caliente y la fría.
5. Las superficies de ambas placas tienen que mantenerse rígidas cuando entren en contacto con las muestras, para asegurar que la planicidad y paralelismo.
6. Las superficies de ambas placas deben tener una emisividad entre 0,8 y 0,9.
7. La fuente de calor tiene que ser ubicada simétricamente en la placa caliente, para asegurarnos temperaturas iguales en las caras opuestas de la placa.
8. La separación que existe entre la guarda y la placa caliente tiene que ser uniforme, y para no exceder la diferencia de temperatura entre ellas de 0,2 K.
9. El tamaño del equipo puede estar entre 0,2 m a 1 m de diámetro; si es que se trata de un equipo circular; o de largo si se trata de un cuadrado.
10. Los sensores de temperatura deben ser termocuplas tipo K para adquirir los datos.
11. La zona de medición tiene que estar aislado de cualquier factor externo que pueda variar el flujo de calor del mismo.

2.5 Diseño Conceptual del equipo APCG.

2.5.1 Muestra.

Se trabajó con una muestra de fabricación nacional de un panel prefabricado; el cual está compuesto por esferas de poliestireno pre expandido, arenas, fibra mineral, entre otros. La empresa presenta su producto con la siguiente tabla de características técnicas:

Tabla 2.2 Características técnicas de la muestra.

Fuente: [Elaboración Propia]

Espesor [mm]	Longitud [mm]	Ancho [mm]	Peso [Kg/m²]
60	2440	610 (305)	46-48
75			54-56
90			62-64
100			70-72
125			84-86
150			100-102

Con estos datos dados, se trabajó con un espesor de 150 mm bloque dado por el cliente, con el peso de este bloque se realizó la simulación de la fuerza de comprensión que existe en la placa caliente se consideró el bloque con un peso de 102 Kg/m² aproximadamente, para determinar el espesor de placas de aluminio y no exista deformación durante el tiempo de prueba. Además, la forma geométrica de la muestra tiene que ser cilíndrica, de la misma forma que nuestro equipo, tal como recomienda la norma ASTM C 177.

2.5.2 Placa caliente.

Para determinar el diámetro de la placa caliente se trabajó con el bloque PS-100, se determinó que el diámetro de la placa caliente o el área de medición es de 300 mm, porque la norma ASTM C 177 recomienda, que el espesor de la muestra debe ser al menos 1/3 del diámetro del área de sección.

Con el fin de corroborar que el espesor seleccionado sea el adecuado para la placa caliente, se realizó una simulación en Autodesk Inventor, donde se aplica una carga distribuida a toda la placa caliente, la cual corresponde a la muestra PS-150 para el caso más crítico. Con ello se escogió un espesor para que no exista una deformación mayor al 0,025% del diámetro de la placa caliente, que pueda afectar el ensayo.

La figura 2.2 muestra el diseño de forma de la placa caliente del APCG, sobre la cual se coloca la muestra a analizar. Esta placa se encontraría conformada por

dos placas de aluminio de igual espesor, con una resistencia térmica en medio de las mismas.

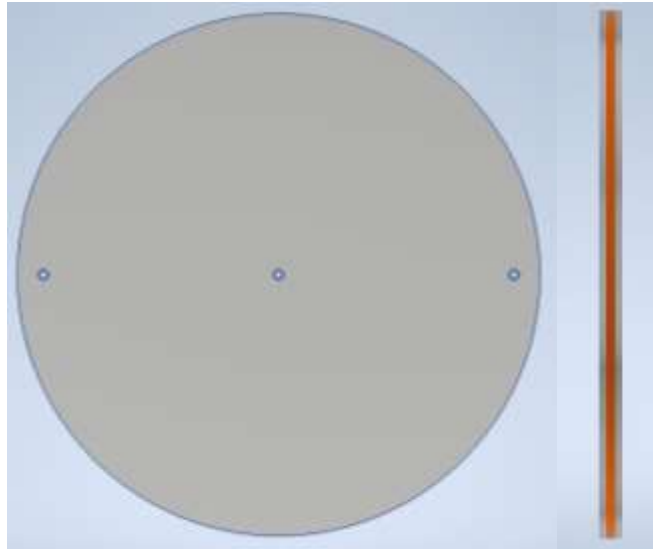


Figura 2.2 Placa caliente del APCI simple.

Fuente: [Elaboración propia]

2.5.3 Placa de guarda.

La guarda es una placa con forma de anillo, donde su diámetro interior es de 302 mm mientras que, para el diámetro exterior del anillo, por recomendación de la norma ASTM C 177, indica que el ancho del anillo de la guarda al menos tiene que ser $1/3$ de la longitud nominal de la placa caliente. Es decir, que la placa caliente es de 300 mm y el ancho del anillo es de 100 mm, dando un diámetro exterior de 500 mm. La placa de guarda es del mismo material de la placa caliente, la cual tendrá 4 orificios sin rosca simétricos, de diámetro 9 mm. Dichos orificios tienen como función de dar soporte de la placa caliente con los ejes lisos. El espesor es el mismo que la del área de medición debido a que esta placa no soporta la carga de la muestra, a menos que se aumente el tamaño de la muestra, el diseño de la guarda se muestra en la figura 2.3.

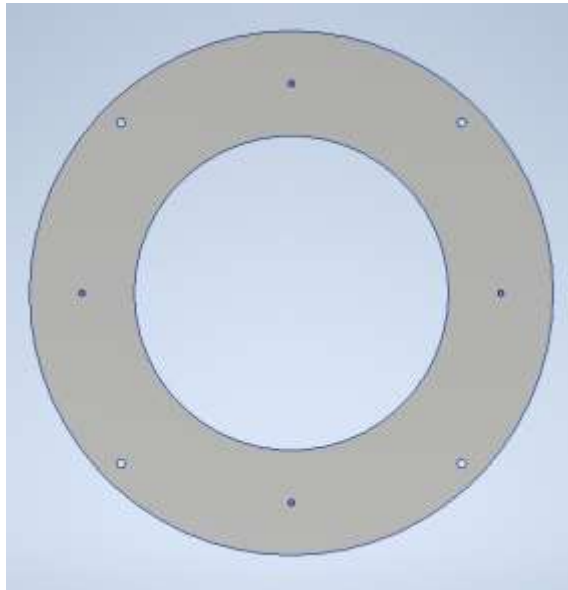


Figura 2.3 Guarda del APCG simple.

Fuente: [Elaboración propia]

Entre la placa de guarda y la placa caliente existe una diferencia de diámetro interior y exterior, respectivamente, esto se lo conoce como espacio anular. El espacio anular permite asumir en el cálculo que no existen pérdidas laterales. Dicho espacio es de aproximadamente 1 mm tal como indica la norma ASTM C 177.

2.5.4 Placa fría.

La placa fría está compuesta por tres capas, las dos tapas exteriores son de aluminio de un espesor de 4 mm, entre las dos se coloca un tubo de cobre de 3/8 de pulgada; en el cual fluye el líquido refrigerante, lo cual permite que mantenga la temperatura baja y constante de esta placa, tal como se muestra en la figura 2.4.

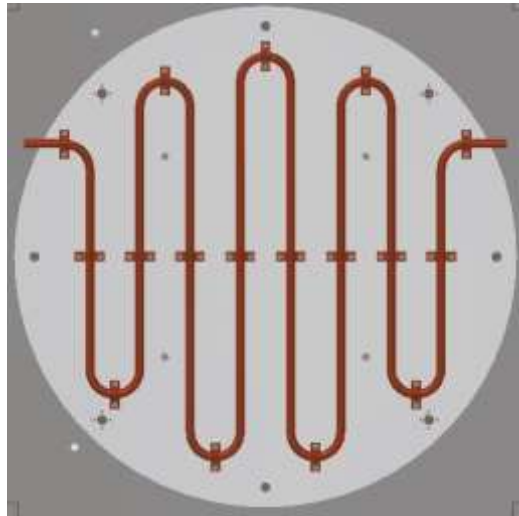


Figura 2.4 Placa fría del APCG simple, con mecanizado de la tubería de cobre.

Fuente: [Elaboración propia]

Esta placa también tiene 4 bujes lisos de bronce, que tienen dos objetivos, la primera de evitar desgaste de los tornillos, y el segundo de darle movimiento a la placa fría para que aproxime o aleje de la placa caliente de acuerdo al espesor de la muestra.

2.5.5 Mecanismo de movimiento – Tornillo de potencia

El acoplamiento de la muestra entre las placas requiere variar la distancia entre las mismas. Para ello se planteó emplear un tornillo de potencia que permita desplazar la placa fría de manera vertical, ya que la placa caliente se encontraría fija a la base de la estructura.

El mecanismo consta de un tornillo de potencia con una palanca de desplazamiento que permita dar el avance requerido. El sistema está formado por una barra roscada M13 de acero inoxidable, y su respectiva tuerca con dos varillas soldadas en los extremos actuando como palanca. El diámetro se escogió considerando las medidas disponibles en el mercado y la recomendación del cliente. Para determinar si el diámetro elegido no falla ante los esfuerzos combinados se realizaron los cálculos correspondientes al tornillo de potencia, los cuales se muestran en el Apéndice C.



Figura 2.5 Tornillo de potencia con palanca de desplazamiento.

Fuente: [Elaboración propia]

2.5.6 Sistema de calentamiento para placas.

La placa caliente está compuesta por una resistencia eléctrica circular plana, la cual se emperna entre las placas de aluminio. Esta resistencia permite mantener una temperatura constante en la superficie de la placa caliente, con un rango de temperatura de hasta 100°C.

La resistencia funciona a 110V con una potencia de 800 W, controlado por un circuito eléctrico y electrónico, el cual está compuesto por un selector, bracket, piloto contactor y un termostato con salida relé. La finalidad de este circuito es mantener estable la temperatura de la superficie de la placa caliente durante el ensayo.

2.5.7 Sistema de enfriamiento para placas.

La placa fría debe mantenerse a 20°C, tal como se estableció en los requerimientos del cliente, por ello para conservar la temperatura de la placa fría se diseña un sistema de enfriamiento. Se cuenta con un reservorio para el refrigerante, el cual circula a través de una tubería de cobre que se encuentra entre dos placas de aluminio correspondientes a la placa fría.

El refrigerante recircula a través del sistema mediante una bomba que permite que el fluido retorne hasta el reservorio. El refrigerante empleado fue agua, ya que este permite mantener la temperatura requerida durante la prueba.

Tabla 2.3 Elementos del sistema de enfriamiento.

Fuente: [Elaboración Propia]

Dos placas de aluminio	Bomba
Cañería de cobre	Acoples para cañería
Refrigerante	Reservorio
Switch	Tubería

2.5.8 Sistema de adquisición de datos

Para la obtención de los datos de entrada iniciales se requiere medir varias variables que se obtienen mediante diferentes implementos o sensores. La temperatura de las superficies se registra empleando sensores DS18B20.[33] La señal producida por los sensores de temperatura de la placa caliente, placa de guarda y placa fría es recibida en la placa de expansión del Arduino Mega. Con la información obtenida se realiza el procesamiento de datos en el controlador Arduino para así determinar las variables de salida que son mostradas en la pantalla LCD del equipo y almacenados en una memoria microSD.

Tabla 2.4 Elementos del sistema de adquisición de datos.

Fuente: [Elaboración Propia]

Arduino Mega	4 Termocuplas tipo K
Sensor Shield Arduino Mega 2560	8 Termopares DS18B20 Waterproof
Pantalla LCD 20x4	Adaptador DC 5V – 3A
Módulo LCD I2C	Módulo microSD

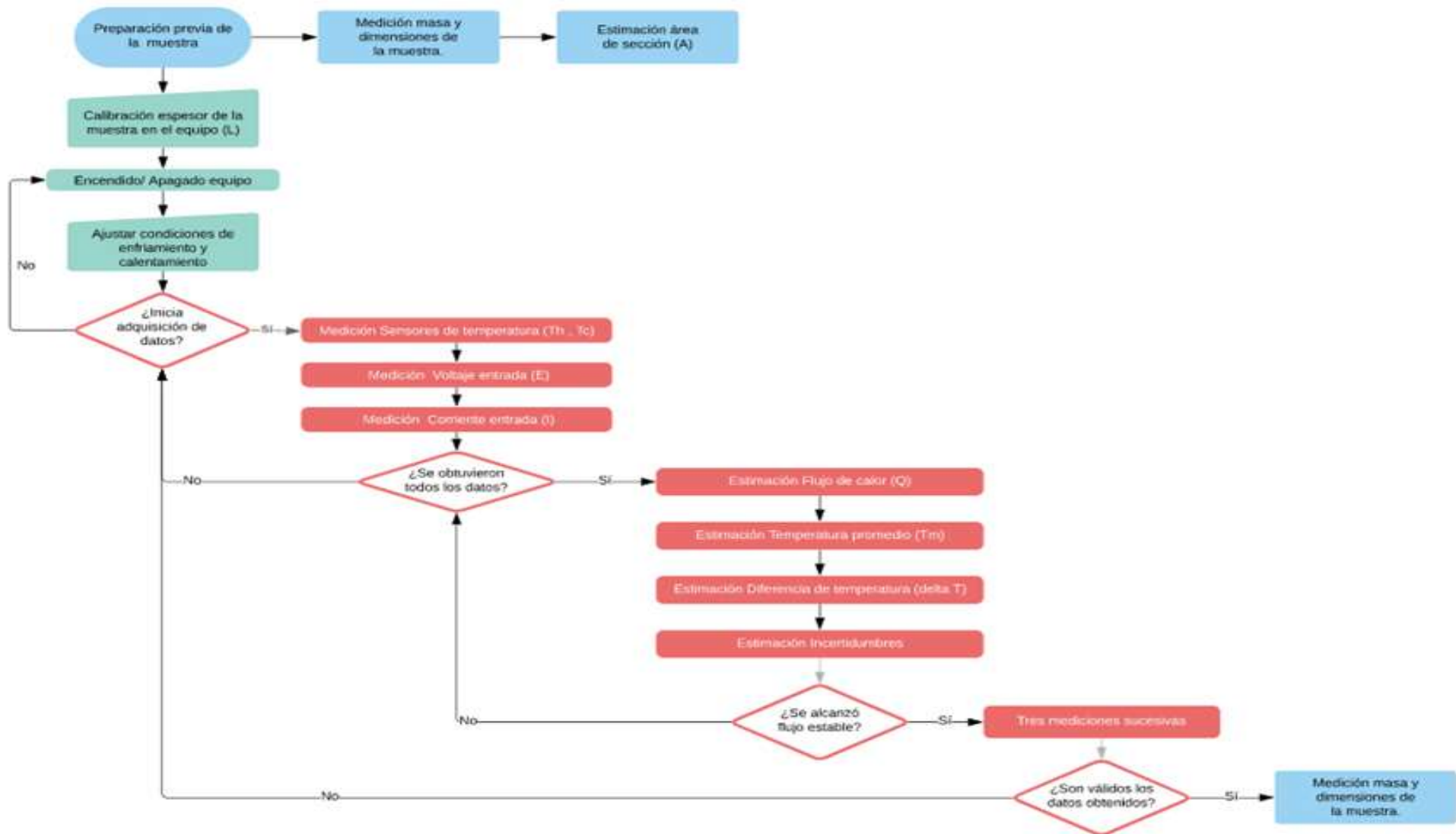


Figura 2.6 Algoritmo de funcionamiento del equipo APCG

Fuente: [Elaboración Propia]

2.5.8.1 Sensores de temperatura.

Se planteó usar sensores de temperatura DS18B20 en presentación encapsulado sumergible, cuyas especificaciones están dadas en la tabla 2.5. Para la placa caliente se emplearon termocuplas tipo k, cuya medición fue realizada mediante un datalogger. Para la placa fría y placa de guarda se utilizaron sensores sumergibles debido a las bajas temperaturas que se espera alcanzar.

Tabla 2.5 Características técnicas de los sensores DS18B20. [34]

Fuente: [Elaboración Propia]

<u>Voltaje de Operación</u>		+3.0 V a +5.5 V
<u>Temperatura de Operación</u>		-55°C a +125°C
<u>Error del termómetro</u>	-10°C to +85°C	±0.5 °C
	-30°C to +100°C	±1 °C
	-55°C to +125°C	±2 °C

Tabla 2.6 Límites de error para diferentes tipos de termocuplas. [35]

Termocupla tipo	Rango de temperatura, °C	Límite de error	
		Estándar (cualquiera superior)	Especial (cualquiera superior)
T	0-350	+/- 1°C or +/- 0,75%	+/- 0,5°C or 0,4%
J	0-750	+/- 2,2°C or +/- 0,75%	+/- 1,1°C or 0,4%
E	0-900	+/- 1,7°C or +/- 0,5%	+/- 1°C or +/- 0,4%
K	0-1250	+/- 2,2°C or +/- 0,75%	+/- 1,1°C or +/- 0,4%
R & S	0-1450	+/- 1,5°C or +/- 0,25%	+/- 0,6°C or +/- 0,1%
B	800-1700	+/- 0,5%	---

Se determinó la cantidad necesaria de los sensores con la norma ASTM C 177, la cual indica la cantidad mínima requerida de sensores acorde con la ecuación 2.11. Si la placa es redonda, estos deben estar espaciados equitativamente para obtener los datos de temperatura promedio de cada placa, la caliente y fría.

$$\#_{\text{sensores}} = 10\sqrt{A} \quad (2.11)$$

Dónde:

- A: Es el área de la placa caliente.

Realizando los cálculos se obtuvo que hay que colocar como mínimo, por cada superficie de placa, 3 termopares. Se decidió colocar 4 sensores para obtener mayor información y asegurarnos que las temperaturas de las placas sean estables.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Diseño del Equipo de Placa Caliente con Guarda - APCG.

El modelo desarrollado se construyó a partir del diseño inicial propuesto, posterior a eso se añadieron algunos soportes de apoyo para el tornillo de potencia y para la ubicación de paneles aislantes. Algunos accesorios como ruedas y agarraderas también se han considerado en el modelo construido.

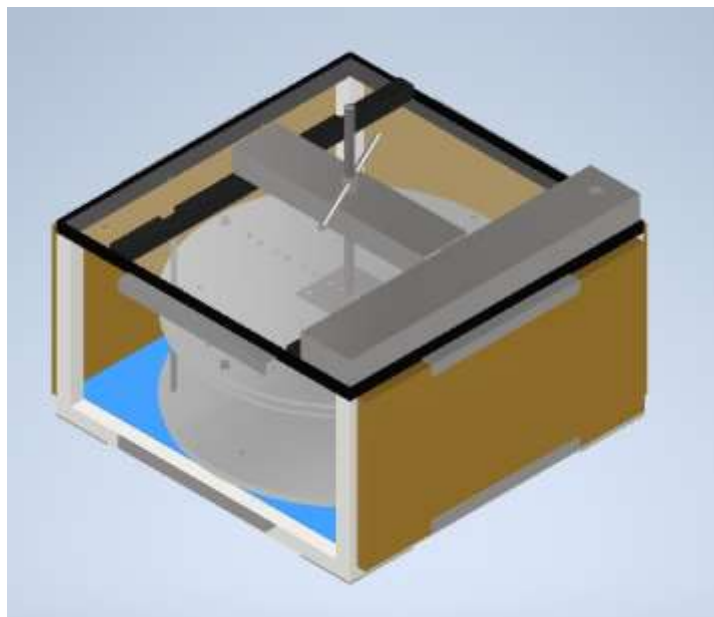


Figura 3.1 Vista del equipo final APCG

Fuente: [Elaboración propia]

3.1.1 Estructura del equipo

Los soportes del equipo se fabricaron con elementos estructurales de acero ASTM A36, unido mediante juntas soldadas. El cuerpo de la estructura se encarga de soportar todos los componentes del equipo. La estructura base fue de tubo cuadrado 1" formando un cubo con dimensiones de 290 mm de alto con un área de superficie de 490 x 534 mm.

Tabla 3.1 Elementos estructura del equipo APCG.

Fuente: [Elaboración Propia]

Elementos estructura - APCG	Material	Cantidad	Longitud [mm]	Espesor [mm]
Tubo cuadrado de 1"	Acero A36	6	490	2
		4	290	2
		2	534	2
Ángulo de 1"		2	490	3
Ángulo de 3/4"		4	540	3
Plancha base placa caliente		1	540x490	2



Figura 3.2 Vista de la estructura del equipo APCG.

Fuente: [Elaboración Propia]

3.1.2 Tornillo de potencia

El tornillo de potencia se fabricó con una varilla roscada M13 de acero inoxidable y una longitud de 300 mm. Alrededor de la varilla se colocó su respectiva tuerca con las dos varillas soldadas que actúan como palanca, para lograr la transmisión del movimiento vertical.

A su vez se coloca una placa de 100 x 100 mm y 3mm de espesor emperrada con tuercas galvanizadas M8 sobre la cara superior de la placa fría. Esta placa se sujeta de manera perpendicular con el tornillo de potencia mediante soldadura alrededor del mismo.



Figura 3.3 Vista de la estructura con el tornillo de potencia.

Fuente: [Elaboración Propia]

3.1.3 Elementos del equipo APCG.

En la tabla 3.2 se indican las características de los componentes construidos para el APCG, de manera que cumplan con los requerimientos considerados durante el proceso de diseño.

Para la fabricación de las placas de aluminio se realizaron cortes con plasma sobre una plancha de aluminio, considerando las dimensiones dadas en un plano de construcción. La placa caliente se conformó por las dos planchas circulares de aluminio con la resistencia eléctrica en el centro. Conformaron un solo cuerpo al sujetarse por cuatro pernos M4 de acero galvanizado. La placa de la guarda se construyó con tres anillos de aluminio sujetos por cuatro pernos M4.

La placa fría se armó con dos placas planas circulares, entre las cuales se ubicó la tubería de cobre para la circulación del refrigerante. Las placas se sujetaron con pernos M8, mientras que la tubería se aseguró con guías plásticas.

Tabla 3.2 Componentes del equipo APCG.

Fuente: [Elaboración Propia]

Elementos del APCG	Descripción	Material	Cantidad	Espesor [mm]
Placa Caliente	Placa plana Diámetro 300 mm	Aluminio	2	4
Placa de Guarda	Placa plana Aluminio Diámetro exterior 500 mm Diámetro interior 300 mm	Aluminio	3	4
Placa Fría	Placa plana Diámetro 500 mm	Aluminio	2	4
Resistencia eléctrica	Placa circular plana Diámetro 500 mm	Resina	1	4



Figura 3.4 Vista final de la placa caliente y placa de guarda.

Fuente: [Elaboración propia].



Figura 3.5 Acoplamiento de la resistencia térmica en la placa caliente con la placa de guarda.

Fuente: [Elaboración propia].

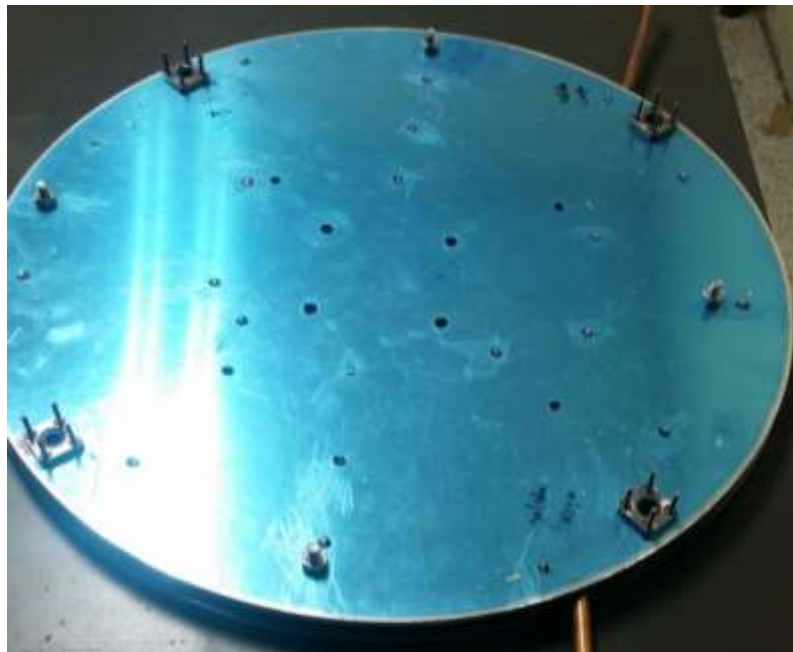


Figura 3.6 Vista final de la placa fría.

Fuente: [Elaboración propia].



Figura 3.7 Vista interior de la Placa Fría con el intercambiador de calor.

Fuente: [Elaboración propia].

3.1.4 Sistema de adquisición de datos

El equipo APCG se controla mediante una tarjeta Arduino MEGA 2560 que es energizada por un adaptador de 12V – 3A que se conecta a cualquier línea de 110V. El controlador se conecta con una placa de expansión, que permite conseguir mayores puertos de conexión para los sensores de temperatura, la pantalla y el almacenamiento en microSD.

Los sensores miden la temperatura de la placa fría y placa de guarda; información que es receptada por el controlador para luego ser mostrada en pantalla, mientras es almacenada en una tarjeta microSD.

Para la obtención de los datos de temperatura en la placa caliente se emplearon termocuplas tipo K conectadas a un datalogger. Esto debido a que fue el tipo de sensor que se acopló de mejor manera a la superficie de la placa.

En la figura 3.8 se observa de manera detallada cómo se realizaron las conexiones del equipo APCG.

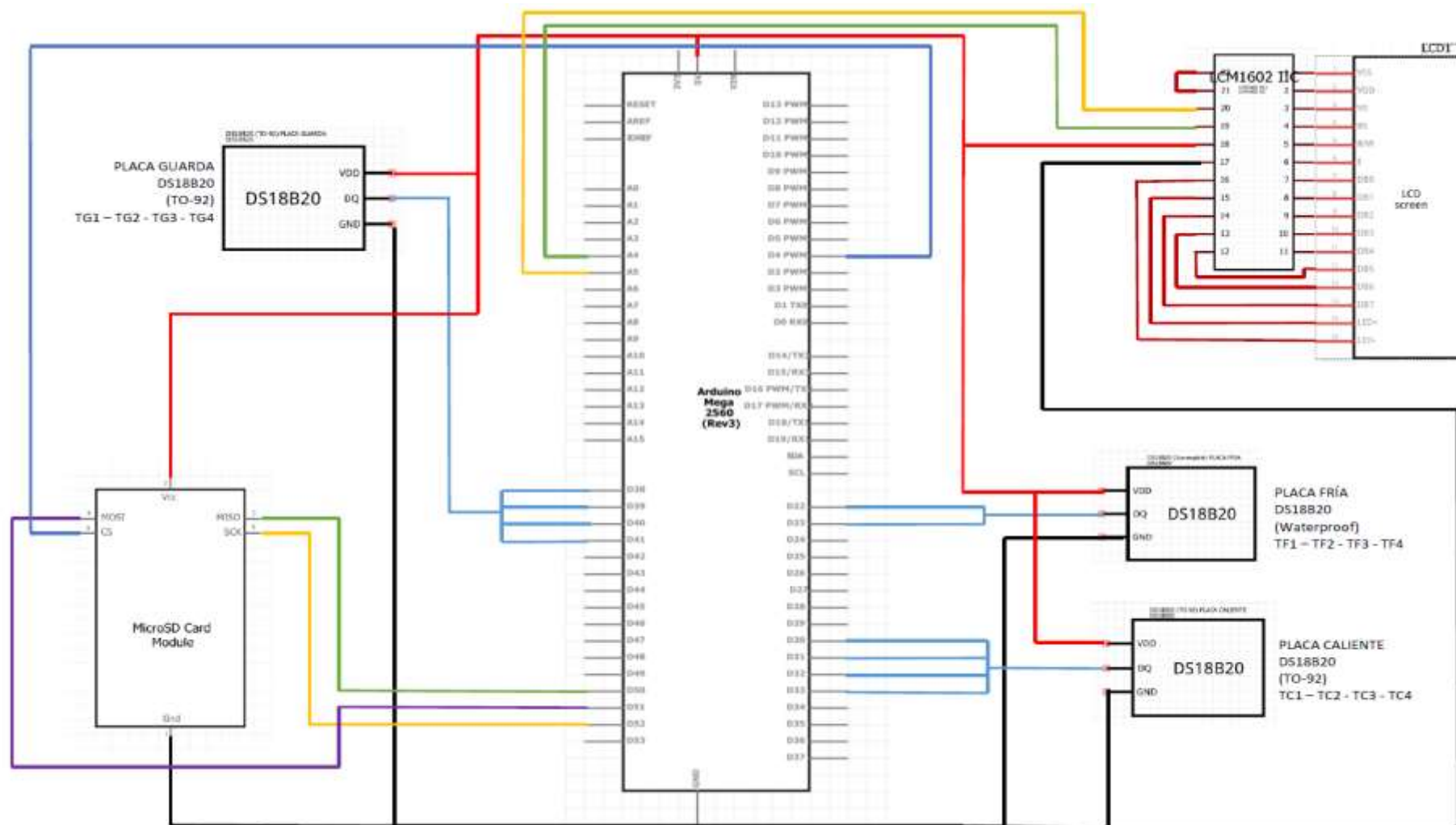


Figura 3.8 Diagrama esquemático de conexiones

Fuente: [Elaboración propia]

Las termocuplas tipo K para la placa caliente se situaron azimutalmente a 90° , 180° , 270° y 360° , tal como lo muestra la figura 3.6. Los sensores están enumerados desde S1 a S4.

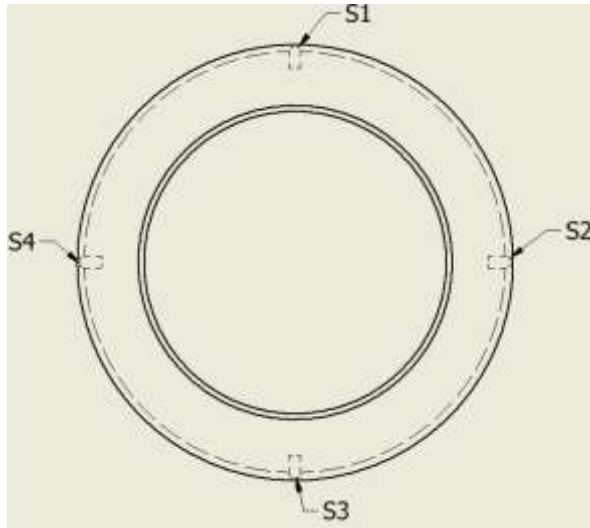


Figura 3.9 Ubicación de los sensores de temperatura en la placa caliente.

Fuente: [Elaboración propia].

Para la guarda, se colocaron sensores similares en el diámetro interior, a 45° , 135° , 225° y 315° , tal como lo muestra la figura 3.7. Los sensores están enumerados desde S5 a S8.

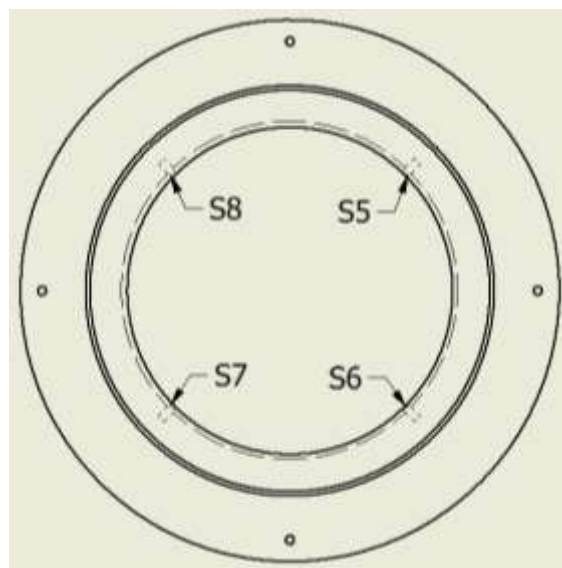


Figura 3.10 Ubicación de los sensores de temperatura en la guarda.

Fuente: [Elaboración propia]

Para la placa fría, se colocaron cuatro termopares DS18B20 sumergibles en cada tapa, las cuales se encuentran a 90°, 180°, 270° y 360°, y se ubicaron a una distancia de 130 mm, medida desde el centro de la placa fría. Los sensores están enumerados desde S9 a S12.

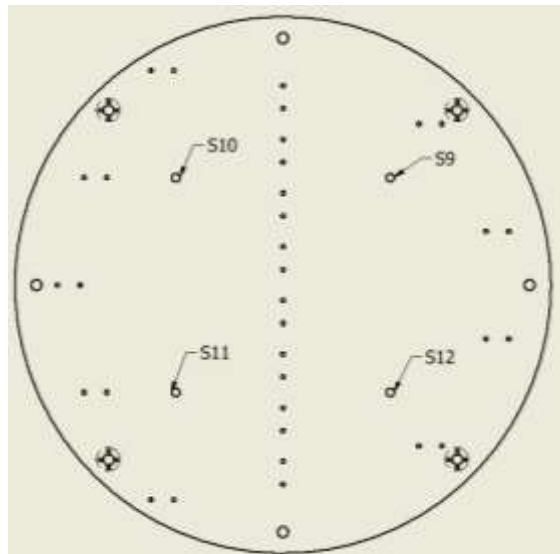


Figura 3.11 Ubicación de los sensores de temperatura en la placa fría.

Fuente: [Elaboración propia]

3.2 Análisis de deformaciones del equipo APCG.

Se realizó un modelo CAD de cada uno de los elementos considerados durante el diseño, para así realizar un análisis de deformaciones del modelo final del equipo APCG. Se simuló en Autodesk Inventor 2020, considerando una carga puntual igual al peso de la mayor muestra a analizar (PS-150), la cual es 71,04 N. Junto con las dimensiones dadas del tornillo de potencia, se realizó el análisis de elementos finitos y se generaron las gráficas de resultados mostrados en las siguientes figuras.

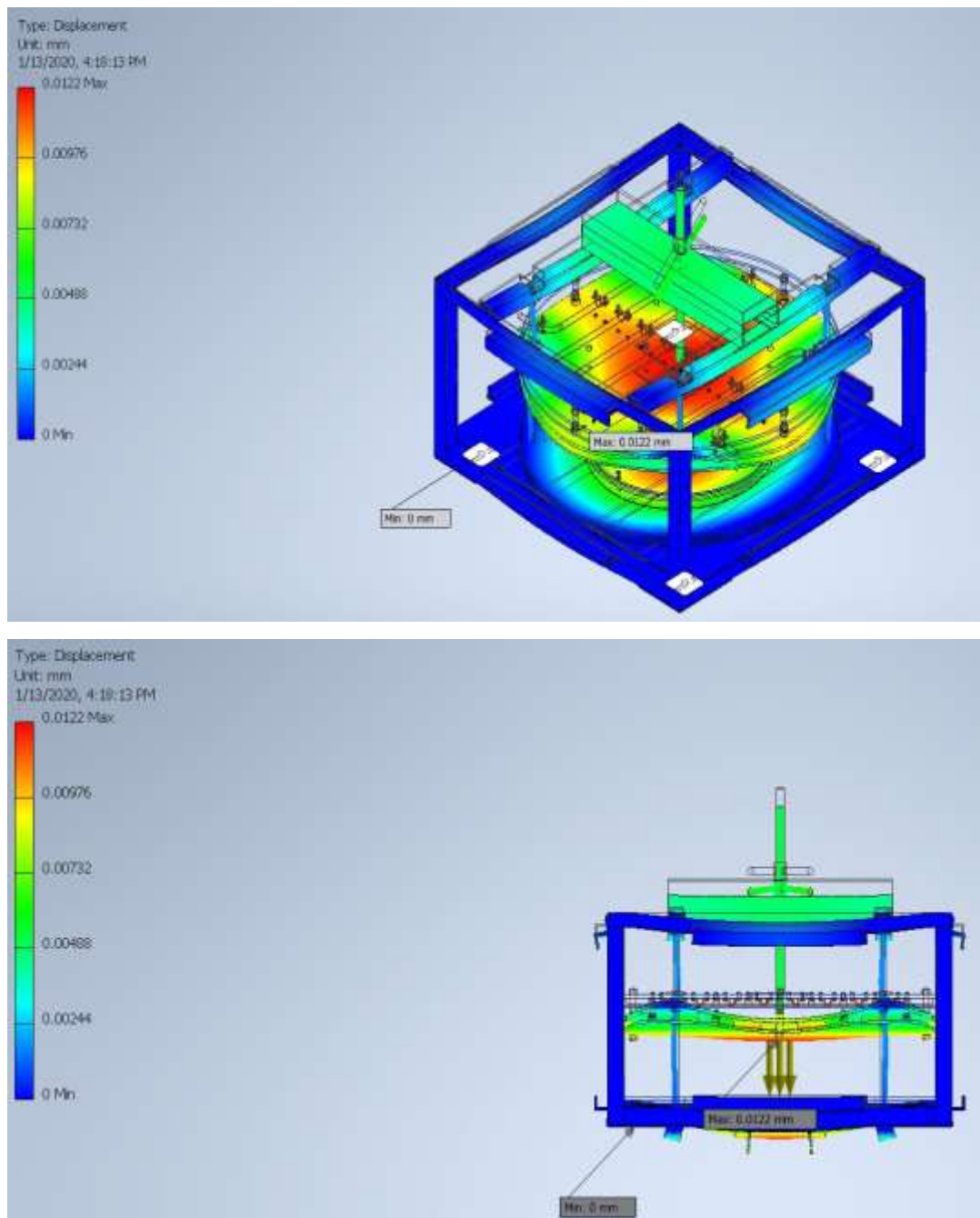


Figura 3.12 Simulación de deflexión plástica del equipo final APCG.

(Superior a Inferior: Vista Isométrica, Vista Frontal)

Fuente: [Elaboración propia]

En la figura 3.12. se denotó por la coloración de las diferentes superficies que, la deformación máxima alcanzada por la placa caliente es de 0.0122 mm, lo cual está por debajo de la deformación permisible según la norma ASTM C-177, de 0.07 mm como deformación máxima.

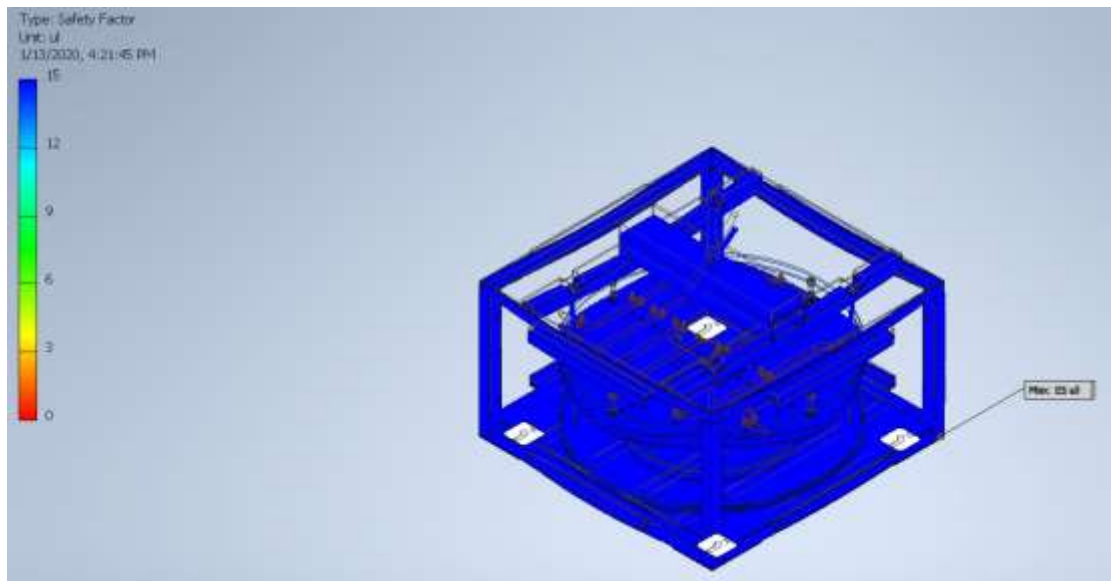


Figura 3.13 Simulación del Factor de Seguridad del equipo final APCG.

Fuente: [Elaboración propia]

En la figura 3.13. se observó que el factor de seguridad determinado para el equipo es de 15, lo cual resultó favorable. Con ello se corroboró el diseño planteado para el equipo APCG.

3.3 Análisis térmico del equipo APCG.

3.3.1 Resistencia eléctrica

Se verificó la potencia de la resistencia eléctrica realizando la simulación en Ansys Fluent versión estudiantil, en donde se analizó la temperatura de superficie sobre la placa caliente. Para ello se consideró una potencia de 800 Watts generando el siguiente resultado.

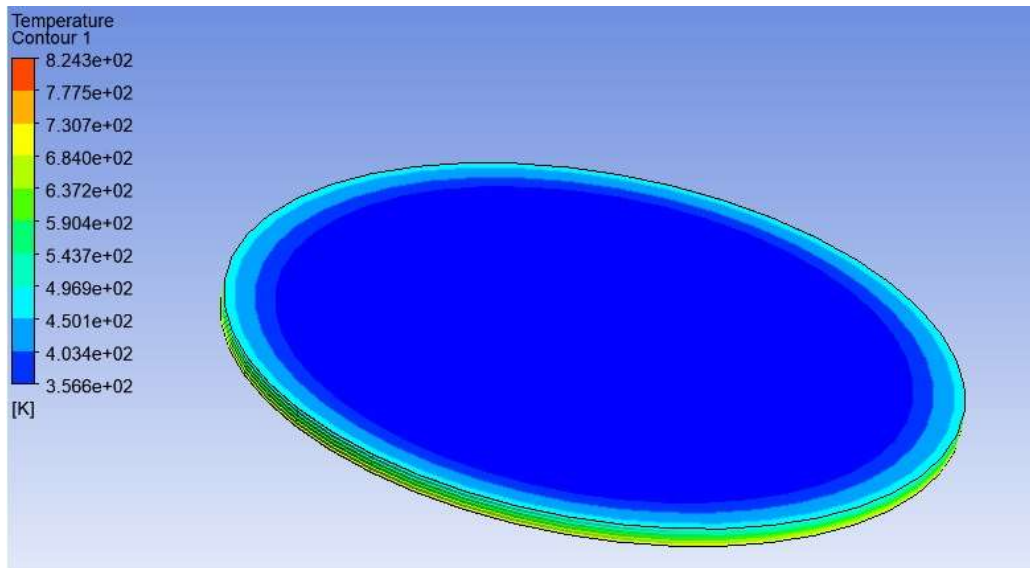


Figura 3.14 Simulación Térmica de la Resistencia Eléctrica.

Fuente: [Elaboración propia]

Como se observó en la figura 3.14 el flujo de calor generado por la resistencia eléctrica hace que la placa caliente, en la parte superior, alcance los 356 K (83°C). lo que está dentro de nuestro requerimiento dados por el cliente.

3.3.2 Paredes aislantes

Para corroborar el espesor de las paredes aislantes, se realizó una simulación en Ansys Steady State Thermal, en donde se diseñó una pared de un espesor de 12 mm. El material de dicha pared se consideró como lana de vidrio, el cual es un material aislante. Se puso los parámetros de fronteras en Ansys y se dieron los siguientes resultados tal como se observa en la imagen 3.15.

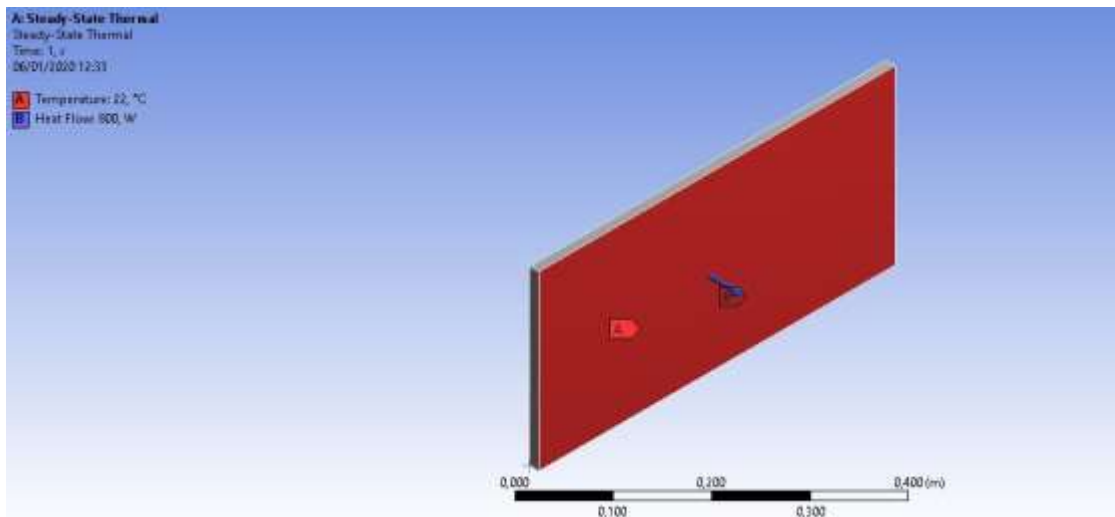
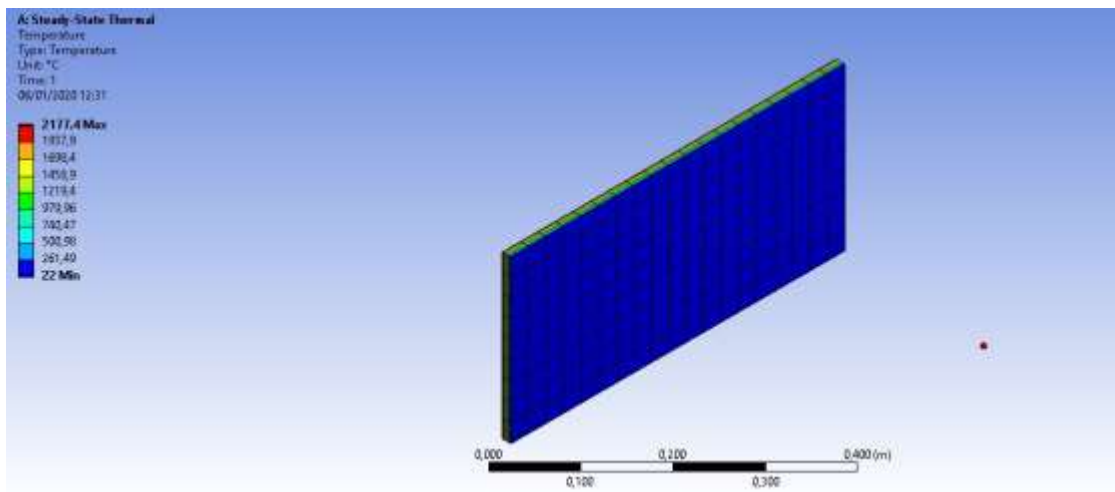


Figura 3.15 Simulación Térmica de las Paredes Aislantes.

(Superior a Inferior: Temperatura máxima, Temperatura de la superficie de la placa)

Fuente: [Elaboración propia]

En la figura 3.15 se observa mediante la simulación térmica en estado estable que la temperatura de superficie exterior, la cual está en contacto con el operador, alcanza una temperatura máxima de 22°C. Esto sucede mientras que al interior del equipo se trabaja con temperaturas de hasta 100°C.

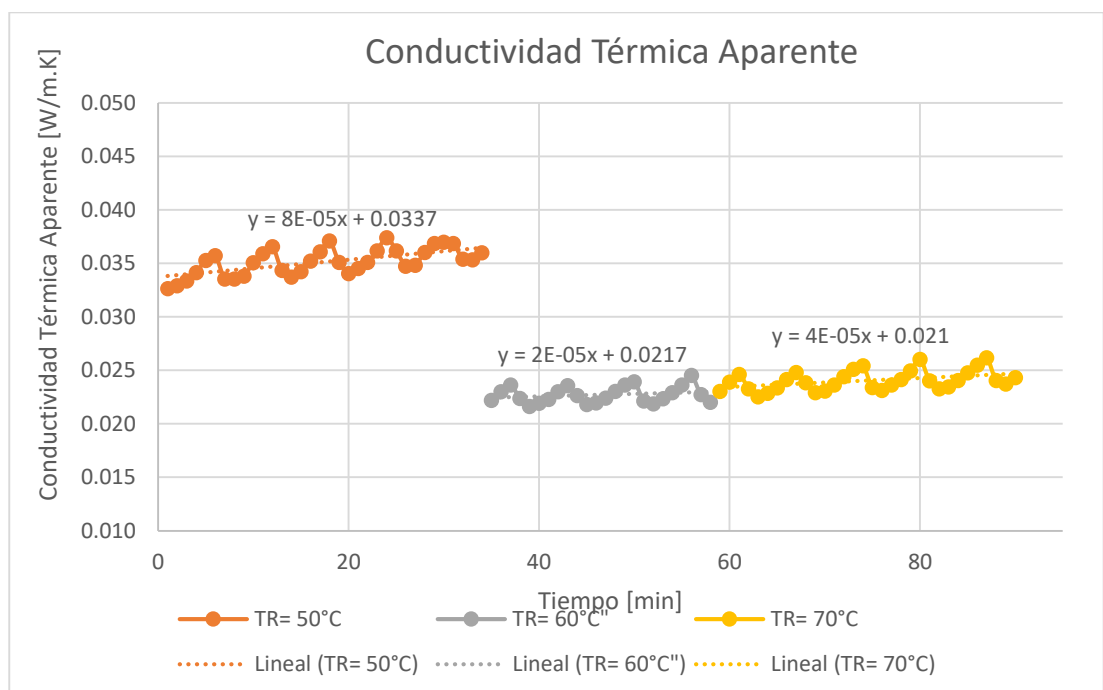
3.4 Resultados de conductividad térmica medidos.

Las mediciones de conductividad térmica arrojaron los valores mostrados en la tabla 3.3. Las pruebas se realizaron para una muestra de panel prefabricado SF 40 PIR a diferentes temperaturas de operación para la resistencia térmica. Las pruebas se realizaron en el equipo APCG fabricado según la norma ASTM C 177. En el apéndice E se muestran los detalles de los resultados obtenidos con el reporte generado.

Tabla 3.3. Valores obtenidos de conductividad térmica para la muestra de panel prefabricado.

Fuente: [Elaboración Propia]

Flujo de Calor [W]	Área de superficie [m ²]	Espesor muestra [m]	TR [°C]	TPF [°C]	TPC [°C]	ΔT [°C]	Conductividad Térmica Aparente [W/m.K]
0.72	0.034225	0.0435	50	27.94	54.02	26.08	0.0351
			60	28.57	68.89	40.33	0.0227
			70	30.85	68.96	38.11	0.0240



Gráfica 3.1 Histórico de conductividad térmica aparente.

Fuente: [Elaboración Propia]

A partir de la gráfica 3.1 se pudo observar el comportamiento de la conductividad térmica aparente. Existe una tendencia en aumento a partir de una temperatura de placa caliente cercana a 60°C. Mientras que hasta los 50°C la conductividad térmica es mayor, a partir de los 60°C esta descendió para luego retomar una tendencia en aumento.

3.5 Análisis de costo

Para llegar a construir el modelo diseñado de APCG se requirió de diversos materiales y procesos que presentaron cierto costo económico que se detalla a continuación.

Tabla 3.4 Presupuesto para la construcción del equipo APCG.

Fuente: [Elaboración Propia]

	Descripción	Costo Unitario	Cantidad	Costo Total
<u>Construcción Estructura</u>				
Soporte externo	Ángulo ¾"	\$ 7,01	1	\$ 7,01
	Tubo cuadrado 1"	\$10,15	1	\$10,15
Base Placa caliente	Ángulo 1" de acero	\$13,77	1	\$13,77
	Funda AGA 6011	\$ 5,58	1	\$ 5,58
	Galón Unidas Anticorrosivo (Gris Mate)	\$16,67	1	\$16,67
	Diluyente Laca	\$ 5,03	1	\$ 5,03
	Perno auto perforantes	\$ 0,04	120	\$ 4,04
	Disco de Pulir 7x1/4 (Grande) Norton	\$ 3,38	1	\$ 3,38
	Disco de Corte 7x1/16 Norton	\$ 1,79	3	\$ 5,37
<u>Sistema de movimiento</u>				
Tornillo potencia	Varilla roscada M13 acero inoxidable	\$5,05	1	\$ 5,05

	Tuerca M13 acero inoxidable	\$0,50	3	\$ 1,50
Ejes guías	Rodamientos lineales	\$ 6,00	4	\$24,00
	Varilla lisa M8 Acero Plata Longitud 300 mm	\$ 3,50	4	\$14,00
<u>Diseño Placa Caliente</u>				
Área de medición	Resistencia térmica plana circular Diámetro 300 mm / Espesor 4 mm	\$120,00	1	\$120,00
	Caja de control con termocupla tipo K, relay de estado sólido	\$150,00	1	\$150,00
	Placa plana Aluminio Diámetro 300 mm	\$30,00	2	\$60,00
Anillo de guarda	Placa plana Aluminio Diámetro exterior 500 mm Diámetro interior 302 mm Espesor 4 mm	\$30,00	3	\$90,00
<u>Diseño Placa Fría</u>				
	Placa plana Aluminio Espesor 4mm Diámetro 500 mm	\$30,00	2	\$60,00
	Tubería de cobre	\$30,00	1	\$30,00
	Abrazadera galvanizada ¾"	\$ 0,12	6	\$ 0,76
	Recipiente de refrigerante de acero inoxidable 3L	\$ 8,00	1	\$ 8,00
	Perno Galvanizado M8	\$ 0,12	8	\$ 0,96
	Perno M3	\$ 0,05	50	\$ 2,50

<u>Sistema de adquisición de datos</u>				
	Arduino mega	\$23,00	1	\$23,00
	Sensor Shield Arduino Mega 2560	\$14,00	1	\$14,00
	Pantalla LCD 20X04	\$15,50	1	\$15,50
	Módulo LCD I2C	\$7,50	1	\$ 7,50
	Módulo MicroSD	\$5,00	1	\$ 5,00
	Sensor DS18B20 (TO-92)	\$2,50	8	\$20,00
	Sensor DS18B20 (Waterproof)	\$9,00	4	\$36,00
	COSTO FINAL			<u>\$758,77</u>

Tabla 3.5 Presupuesto para el costo hora hombre del equipo APCG.

[Fuente: Elaboración Propia]

<u>Costo por mano de obra</u>			
Cantidad de personas	Horas trabajadas	Costo por hora	Costo total
1	60	10	\$600,00

El costo final de fabricación del equipo APCG es de \$1358,77, se consideró un 45% del costo para determinar el precio de venta, el cual es \$1970,22. Comparando con el mercado exterior, un equipo APCG de la misma capacidad de dimensiones para la muestra cuesta \$3500.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Se realizó el diseño estructural del equipo tomando como referencia la norma ASTM C 177 para el diseño de un Aparato de Placa Caliente con Guarda (Lado Simple), que permite medir la conductividad térmica de los materiales de muestra. Con ayuda de la simulación hecha en Inventor se determinó que las placas, caliente y fría, con las dimensiones dadas, se deformaron 0,0122 mm, lo cual está dentro del porcentaje de deformación dado por la norma indicada anteriormente. Además, se determinó que el equipo APCG no llegaba a la ruptura por el factor de seguridad dado en la simulación, dando un valor de 15, y este valor se debe al sobredimensionamiento de los elementos elegidos por el equipo pero que son factibles por ergonomía y fueron dados por el cliente.

Por medio de las ecuaciones del tornillo de potencia que se encuentran bajo esfuerzos combinados dadas en el apéndice C, se determinó que el tornillo M13 de acero inoxidable dada por el cliente no presentará fallas, debido a que el factor de seguridad dio 2.

El intercambiador de calor construido en la placa fría del equipo cumple con los requerimientos de la norma, debido a que no excede el límite de la variación de temperaturas de 20 K entre cada espira, lo cual se comprobó al realizar los respectivos cálculos con las ecuaciones de dadas en el apéndice C y en los datos obtenidos por los sensores de temperatura.

Con la simulación en Ansys Fluent, se determinó la resistencia eléctrica adecuada para el ensayo que cumpla con los requerimientos dados por el cliente, la cual llega a la temperatura de operación máxima de 100°C en 5 minutos, mediante los ensayos del equipo con las muestras de paredes prefabricadas, la placa caliente llegaba a 100°C en 4 minutos aproximadamente; y con los datos obtenidos por las termocuplas durante los ensayos, se comprobó que existe una homogeneidad de temperatura en toda el área de contacto de la placa caliente. Además, en el mismo

software, se realizaron simulaciones de temperaturas en superficies planas donde se determinó que la pared de 12 mm de espesor, hecha de lana de vidrio, aísla las condiciones térmicas internas del equipo del medio ambiente. Cabe recalcar, si es que los ensayos se realizan en un ambiente controlado, donde se tenga las condiciones del entorno controlado, no hay necesidad de colocar dichas paredes aislantes en el equipo.

Con los resultados obtenidos de la muestra dada por el cliente, PIR 40, dio como conductividad térmica 0,02727 W/mK, y revisando la ficha técnica del fabricante, su conductividad térmica es de 0,028 W/mK, lo cual da un error del 2.68%; sin embargo, hay que recalcar que la prueba que realizan el fabricante es una prueba empírica que no sigue ninguna norma establecida. Para poder confirmar el verdadero valor de esta propiedad térmica es enviando la muestra a otra institución que posea un equipo que este diseñado bajo la norma ASTM C-177, y se podría realizar un verdadero valor de la conductividad.

Cada ensayo realizado usó una potencia de 800 W, la cual pertenece a la resistencia eléctrica circular plana, para confirmar se midió el voltaje y la corriente dada por la fuente, y se obtuvieron 110 V y 7,5 A. pero solamente se suministra tal potencia hasta llegar a la temperatura máxima dada a la resistencia, la cual variaba en cada ensayo, es decir, si se realizó el ensayo a 50°C, cuando la resistencia llegue a esa temperatura automáticamente se apaga el equipo y deja de suministrar energía y se vuelve a encender para mantener dicha temperatura del ensayo.

4.2 Recomendaciones

Actualmente la estructura del equipo se encuentra fabricada en acero ASTM A36 seleccionado por su dureza y costo en el mercado. Sin embargo, es posible aligerar el peso de la estructura empleando extrusiones de aluminio considerando la elevación en el costo final del equipo.

Para mejorar la manufactura de las paredes aislantes estas pueden ser fabricadas con policarbonato y lana de vidrio, para así mantener el flujo de calor al interior del equipo y mejorar la visualización del experimento.

El sistema de acoplamiento para la muestra es del tipo manual, se puede variar el tornillo de potencia que actualmente se encuentra por un motor de paso marca NEMA por cada tornillo guía. Estos se moverían de manera coordinada con el mismo paso de avance operado mediante la placa del controlador.

En el proceso de adquisición de datos debe escogerse el tipo de termopares a utilizar, considerando el tamaño que puede ocupar al ser instalado y la temperatura máxima de operación. Adicional a esto se recomienda que el sistema de adquisición de datos sea general para todos los sensores, así se logra mantener el mismo tiempo de referencia para todas las mediciones facilitando la interpretación de los datos.

Para mejorar los resultados obtenidos del equipo, se recomienda hacer los ensayos al vacío en el interior del equipo, mediante el uso de un ventilador, de esta manera se obtiene un valor más cercano de conductividad térmica de los materiales.

Se puede realizar un mecanizado en las placas de aluminio de la placa fría, primero, para que exista una mejor disipación de calor entre la placa de aluminio inferior y el intercambiador de cobre, y segundo, para disminuir la cantidad de agujeros en la placa fría porque no se usarían las abrazaderas de cobre para sujetar el intercambiador de cobre. Además, se puede mejorar la forma del intercambiador optando por una forma de espiral de Arquímedes, debido a que se aprovecha un mayor contacto con la plancha de aluminio, pero hay que recalcar, que la fabricación sería más difícil.

Para que exista una mayor diferencia de temperaturas entre la placa fría y la placa caliente, se puede cambiar la bomba por una que posea mayor caudal de

operación, porque mientras sea mayor será mejor la disipación del calor generada por el contacto con la muestra.

En vez de usar una resistencia eléctrica que funcione en AC, para futuros trabajos, se puede cambiarlo por una fuente reguladora DC conectada a un alambre de NICROM, la cual actúa como fuente de calor para la placa caliente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] GRÁFICOS NACIONALES SA GRANASA, “Vivienda rápida. Las casas de hoy se construyen en fábricas y se montan en el terreno.” [Online]. Available: https://www.expreso.ec/vivir/vivienda-rapida-KUgr_8481612. [Accessed: 21-Sep-2019].
- [2] C. Vela, “Henry Yandún y Roger Jaramillo - Hacia un futuro sustentable - CLAVE!” [Online]. Available: <https://www.clave.com.ec/2019/03/28/henry-yandun-roger-jaramillo-hacia-futuro-sustentable/>. [Accessed: 21-Sep-2019].
- [3] “PANELEGO – Kubiec.” [Online]. Available: <https://kubiec.com/panelego/>. [Accessed: 21-Sep-2019].
- [4] S. Marti, “La construcción industrializada: ¿a qué nos referimos?,” 2017. [Online]. Available: <https://nibug.com/que-es-la-construccion-industrializada/>. [Accessed: 29-Sep-2019].
- [5] Editor Tecnyconta, “Las razones para construir con prefabricados de hormigón.” [Online]. Available: <https://www.tecnyconta.es/construir-prefabricados-hormigon/>. [Accessed: 29-Sep-2019].
- [6] ONU, “Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible.” [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. [Accessed: 29-Sep-2019].
- [7] ONU, “Infraestructura - Desarrollo Sostenible.” [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>. [Accessed: 29-Sep-2019].
- [8] ONU, “Ciudades - Desarrollo Sostenible.” [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>. [Accessed: 29-Sep-2019].
- [9] J. J. del Coz Díaz and J. L. Suárez Sierra, “CONSTRUCCIÓN INDUSTRIALIZADA SOSTENIBLE: LOS EDIFICIOS Y VIVIENDAS QUE NECESITAMOS.”
- [10] J. F. Sánchez, “Paneles Prefabricados de Hormigón en fachadas.,” Universidad Politécnica de Madrid, 2010.
- [11] Grupo PANEL SANDWICH, “Venta de Panel Sandwich - Panel Sandwich Ecuador.” [Online]. Available: <http://www.panelsandwich.ec/>. [Accessed: 23-Sep-2019].
- [12] HORMYPOL, “Micro Hormigón Vibro Prensado en Encofrado Sintético en Paneles Laminas y Formas HORMYPOL: hormypol, hormigon, armado, microhormigon,

- vibroprensado, encofrado, prensado, sintético, quito, ecuador.” [Online]. Available: <http://hormypol.com/hormypol-hormigon-armado-microhormigon-vibroprensado-encofrado-prensado-sintetico-quito-ecuador.php>. [Accessed: 23-Sep-2019].
- [13] “Laminas de micro hormigón HORMYPOL: catalogo, construccion, viviendas, infraestructura, hormigon, oficinas, fachadas, flotantes, muros, quito, ecuador.” [Online]. Available: <http://www.hormypol.com/catalogo-construccion-viviendas-infraestructura-hormigon-oficinas-fachadas-flotantes-muros-quito-ecuador.php?tablajb=productos&p=2&t=Laminas-de-micro-hormig%F3n&>. [Accessed: 05-Sep-2019].
- [14] “Casa Mía - Casas Prefabricadas.” [Online]. Available: <https://www.casamia.com.ec/>. [Accessed: 05-Sep-2019].
- [15] “Planchas de Fibrocemento - EC | Paredes, Fachadas, Entrepisos y Siding.” [Online]. Available: <http://www.acimco.com/productos/fibrocemento/>. [Accessed: 05-Sep-2019].
- [16]. “Bienvenido ..” [Online]. Available: <http://www.aislapol.com/indexlosa.html>. [Accessed: 05-Sep-2019].
- [17] I. J. A. Novas Cabrera, “Sistemas constructivos prefabricados aplicables a la construcción de edificaciones en países en desarrollo.” Universidad Politécnica de Madrid, 2010.
- [18] S. Kalpakjian and S. Schmid, “Propiedades físicas de los materiales.” in *Manufactura, ingeniería y tecnología.*, Quinta edi., México, D. F.: PEARSON EDUCACIÓN, 2014, p. 107.
- [19] F. Incropera and D. De Witt, *Fundamentos de transferencia de calor.*, Séptima Ed. México: PRENTICE HALL, 2014.
- [20] E. D. T. EDIBON, “TCMC. Equipo de Conductividad Térmica de Materiales de Construcción y Aislantes.” [Online]. Available: <http://www.edibon.com/es/files/equipment/TCMC/catalog>. [Accessed: 29-Sep-2019].
- [21] S. García Duarte and O. González Rodríguez, “Metodología para la medición de la conductividad térmica de materiales de construcción.” in *IV Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica.*, 2012, p. 21.
- [22] C. A. Ferriz Rodríguez, “DISEÑO, FABRICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN

- DISPOSITIVO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS EN MATERIALES SECOS DE ALTA RESISTENCIA TÉRMICA Y BAJA TEMPERATURA DE USO.,” Universidad Autónoma de Barcelona., 2007.
- [23] M. F. Creus, D. E. Paz, A. L. Galella, and R. S. Enrich, “Diseño conceptual de un dispositivo de bajo costo para medir la conductividad térmica de materiales secos en régimen estacionario,” in *XXXIV Encuentro Arquisur y XIX Congreso de Escuelas y Facultades Públicas de Arquitectura de los países de América del Sur*, 2015.
- [24] TA INSTRUMENTS, “Medidor de conductividad térmica – TA Instruments.” [Online]. Available: <https://www.tainstruments.com/category/products-es/medidor-de-conductividad-termica-es-8/?lang=es>. [Accessed: 30-Sep-2019].
- [25] TA INSTRUMENTS, “Fox 600 – TA Instruments.” [Online]. Available: <https://www.tainstruments.com/fox-600/?lang=es>. [Accessed: 30-Sep-2019].
- [26] L. Lira-Cortés; and E. González Rodríguez, O. J. ; Méndez-Lango, “Medición de la Conductividad Térmica de Algunos Materiales Utilizados en Edificaciones.,” *Simp. Metrol.*, 2008.
- [27] K. ; MARTÍN ESCUDERO, A. ; ERCORECA GONZÁLEZ, I. ; FLORES ABASCAL, Z. ; AZKORRA LARRINAGA, and Á. CAMPOS CELADOR, “Diseño de un medidor de conductividad térmica para prácticas de laboratorio - Dialnet,” 2013, pp. 1331–1338.
- [28] ASTM, *C 177 – 97 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*. 1997.
- [29] I. G. Marbán Betancourt, “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN INSTRUMENTO DE PLACAS PLANAS PARALELAS CON GUARDA CON DOBLE LADO DE MEDICIÓN Y CON CÁMARA DE AMBIENTE CONTROLADO PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE MATERIALES SÓLIDOS AISLANTES.,” Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - CENIDET, 2005.
- [30] Á. Vázquez, G. Duarte, and L. Cortés, “MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE PENCAS DE MAGUEY, MATERIAL QUE SE UTILIZA EN LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA TRADICIONAL,” 2010.

- [31] V. ; Martínez and L. Lira, "CARACTERIZACIÓN DE UN APARATO DE PLACA CALIENTE CON GUARDA EN DESARROLLO EN EL CENAM, PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE MATERIALES SÓLIDOS AISLANTES," *Simp. Metrol.*, 2004.
- [32] R. Pavel and R. Torres, "Equipo para la medición de la conductividad térmica de materiales homogéneos y heterogéneos Poder Calorífico del Gases Combustibles View project Arquitectura Bioclimática para Yucatán View project Raúl Ernesto Canto Cetina Universidad Autónoma de Yucatán," *Simp. Metrol.*, 2014.
- [33] maxim integrated, "DS18B20 - Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer," 2019. [Online]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. [Accessed: 09-Jan-2020].
- [34] maxim integrated, "DS18B20 Datasheet."
- [35] WEISZ, "Termocuplas - Características técnicas de las termocuplas." [Online]. Available: <http://www.weisz.com/wp-content/uploads/Caracteristicas-tecnicas-de-termocuplas.pdf>. [Accessed: 03-Feb-2020].

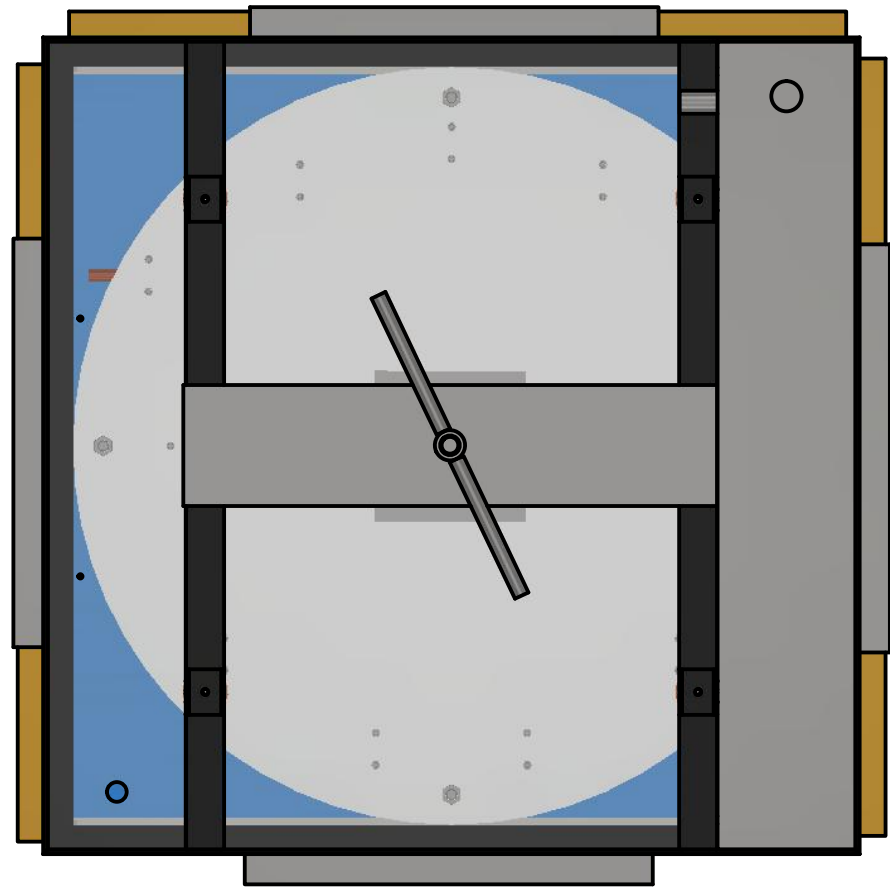
APÉNDICES

APÉNDICE A - PLANOS DE DISEÑO DEL APARATO DE PLACA CALIENTE CON GUARDA.	67
APÉNDICE B - MANUAL DE OPERACIÓN DEL APARATO DE PLACA CALIENTE CON GUARDA (APCG)	74
APÉNDICE C – DISEÑO DEL APARATO DE PLACA CALIENTE CON GUARDA (CÁLCULOS)	78
APÉNDICE D - RESULTADOS DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA UNA MUESTRA DESCONOCIDA DE PANEL PREFABRICADO.	84

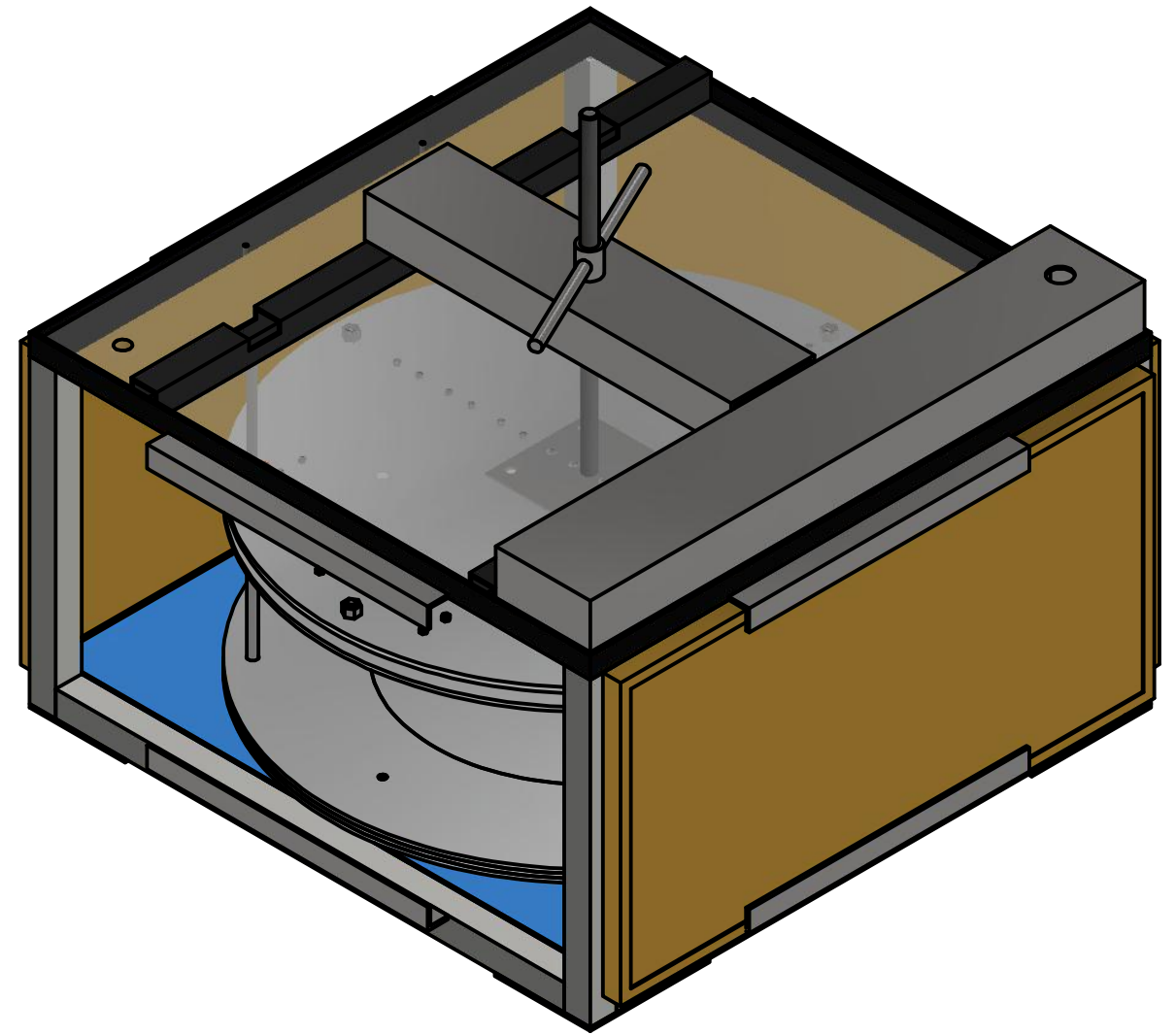
APÉNDICE A

-

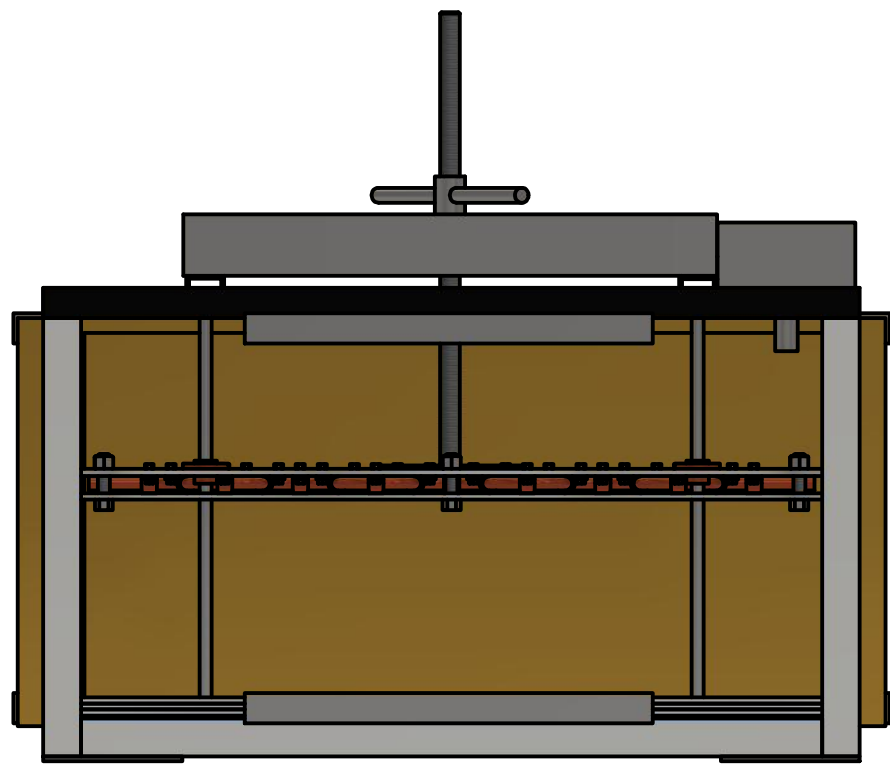
**PLANOS DE DISEÑO DEL APARATO DE PLACA CALIENTE
CON GUARDA.**



Vista Superior

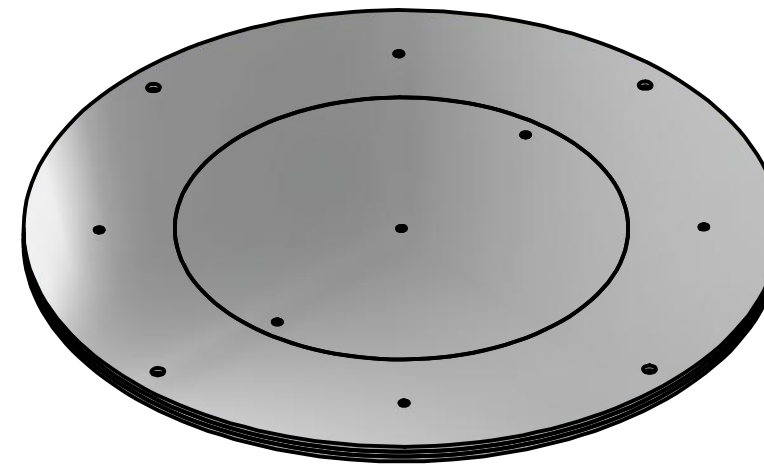
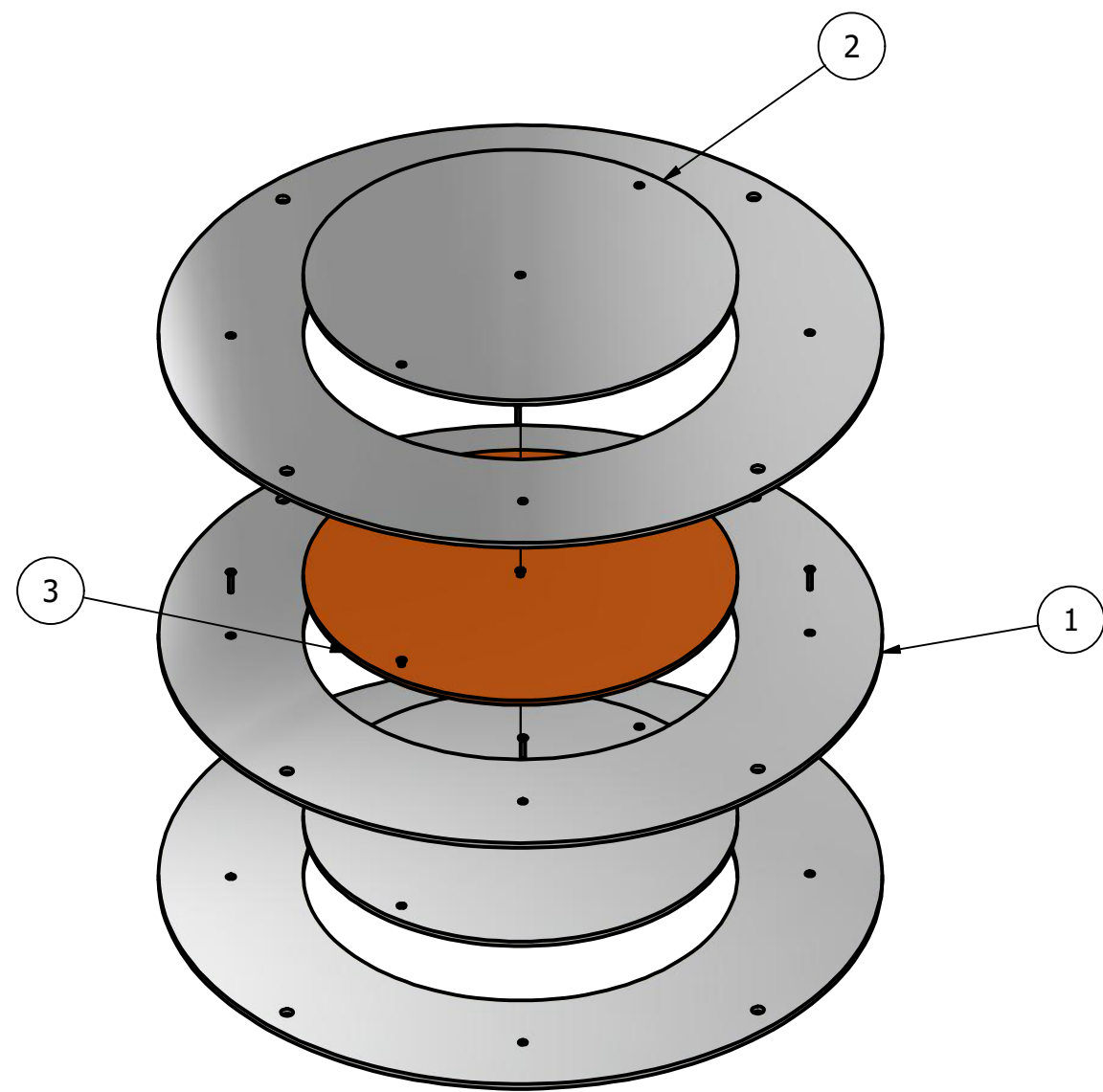


Vista Isométrica



Vista Frontal

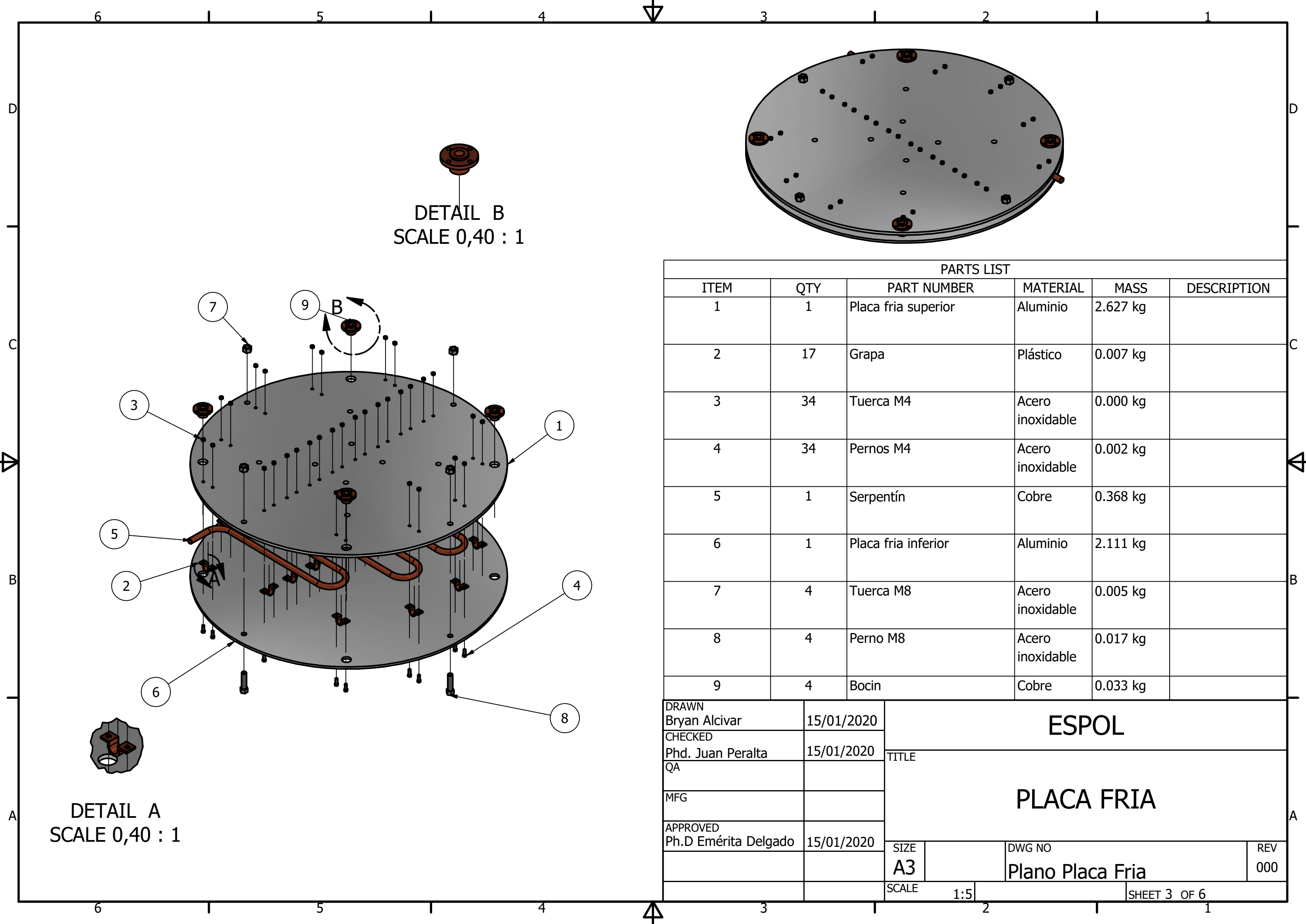
DRAWN Bryan Alcivar	15/01/2020	ESPOL		
CHECKED Ph.D Juan Peralta	15/01/2020			
QA		PLANOS GENERALES DEL APCG CON TORNILLO DE POTENCIA		
MFG		SIZE A3	DWG NO Vistas APCG	REV 000
APPROVED Ph.D Emérita Delgado	15/01/2020	SCALE 1:5	SHEET 1 OF 6	



Placa caliente empernadas con M3

PARTS LIST					
ITEM	QTY	PART NUMBER	MATERIAL	MASS	DESCRIPTION
1	3	Guarda	Aluminio	1.354 kg	
2	2	Placa caliente	Aluminio	0.763 kg	
3	1	Resistencia electrica	Resina	0.390 kg	

DRAWN Bryan Alcivar		15/01/2020	ESPOL		
CHECKED Ph.D Juan Peralta		1/15/2020			
QA			PLACA CALIENTE Y GUARDA		
MFG					
APPROVED Ph.D Emérita Delgado		1/15/2020			
			SIZE A3	DWG NO Plano Placa Caliente	REV 000
			SCALE 1:5	SHEET 2 OF 6	



DETAIL B
SCALE 0,40 : 1

DETAIL A
SCALE 0,40 : 1

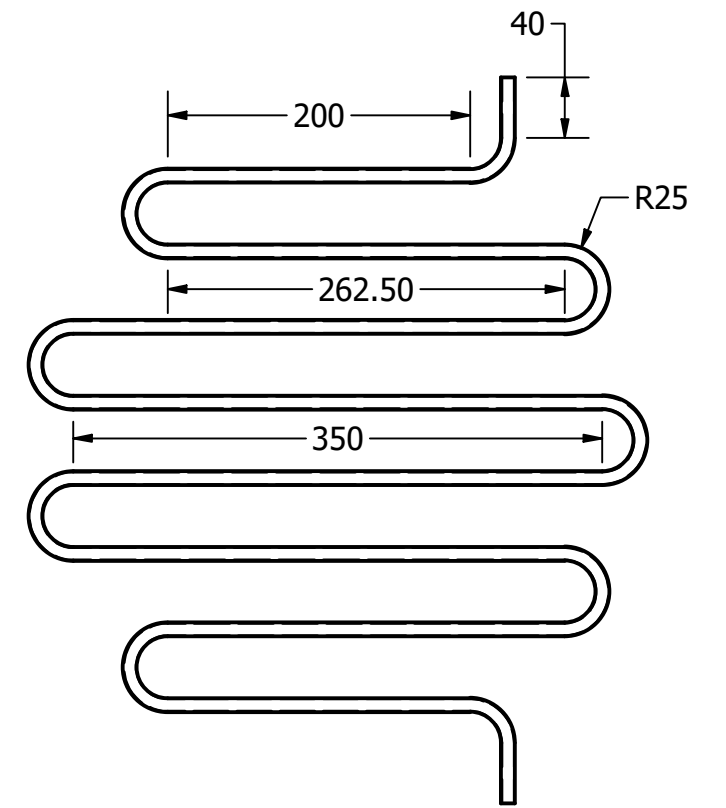
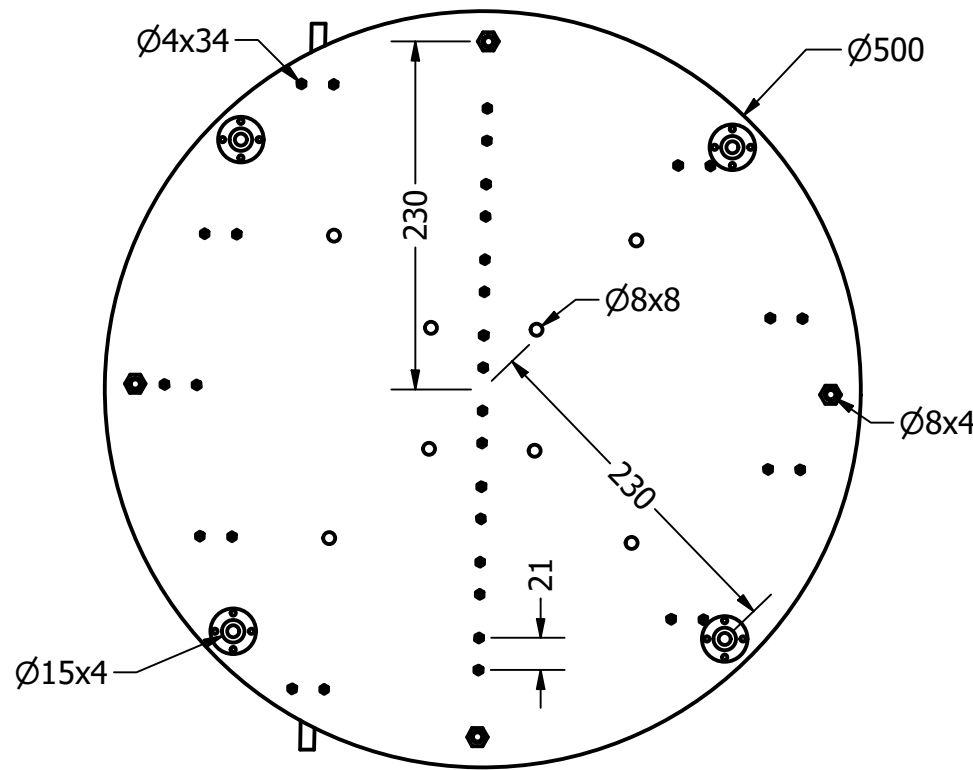
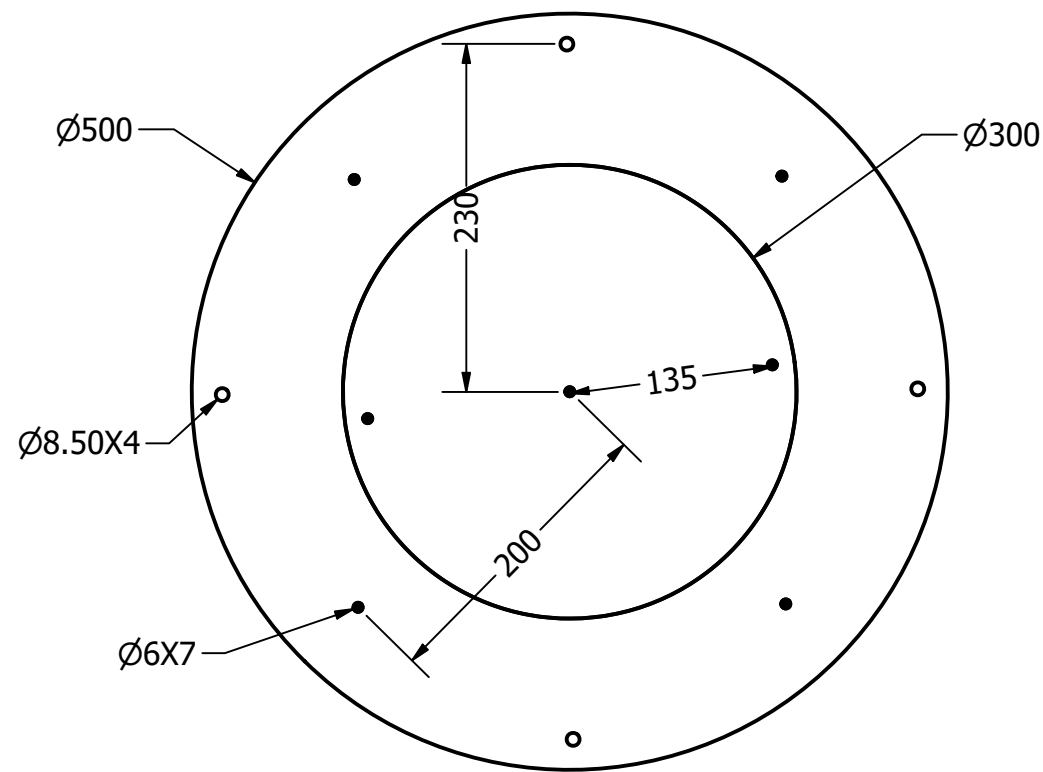
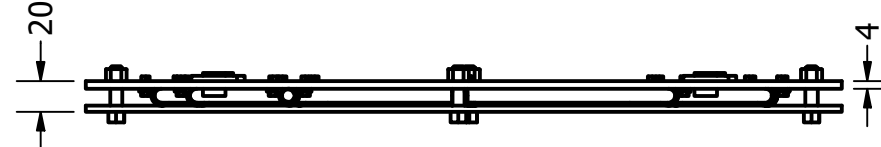
PARTS LIST					
ITEM	QTY	PART NUMBER	MATERIAL	MASS	DESCRIPTION
1	1	Placa fria superior	Aluminio	2.627 kg	
2	17	Grapa	Plástico	0.007 kg	
3	34	Tuerca M4	Acero inoxidable	0.000 kg	
4	34	Pernos M4	Acero inoxidable	0.002 kg	
5	1	Serpentín	Cobre	0.368 kg	
6	1	Placa fria inferior	Aluminio	2.111 kg	
7	4	Tuerca M8	Acero inoxidable	0.005 kg	
8	4	Perno M8	Acero inoxidable	0.017 kg	
9	4	Bocin	Cobre	0.033 kg	

DRAWN Bryan Alcivar		15/01/2020		ESPOL	
CHECKED Ph.D. Juan Peralta		15/01/2020			
QA				PLACA FRIA	
MFG					
APPROVED Ph.D Emérita Delgado		15/01/2020			
		SIZE A3	DWG NO Plano Placa Fria		REV 000
		SCALE 1:5	SHEET 3 OF 6		

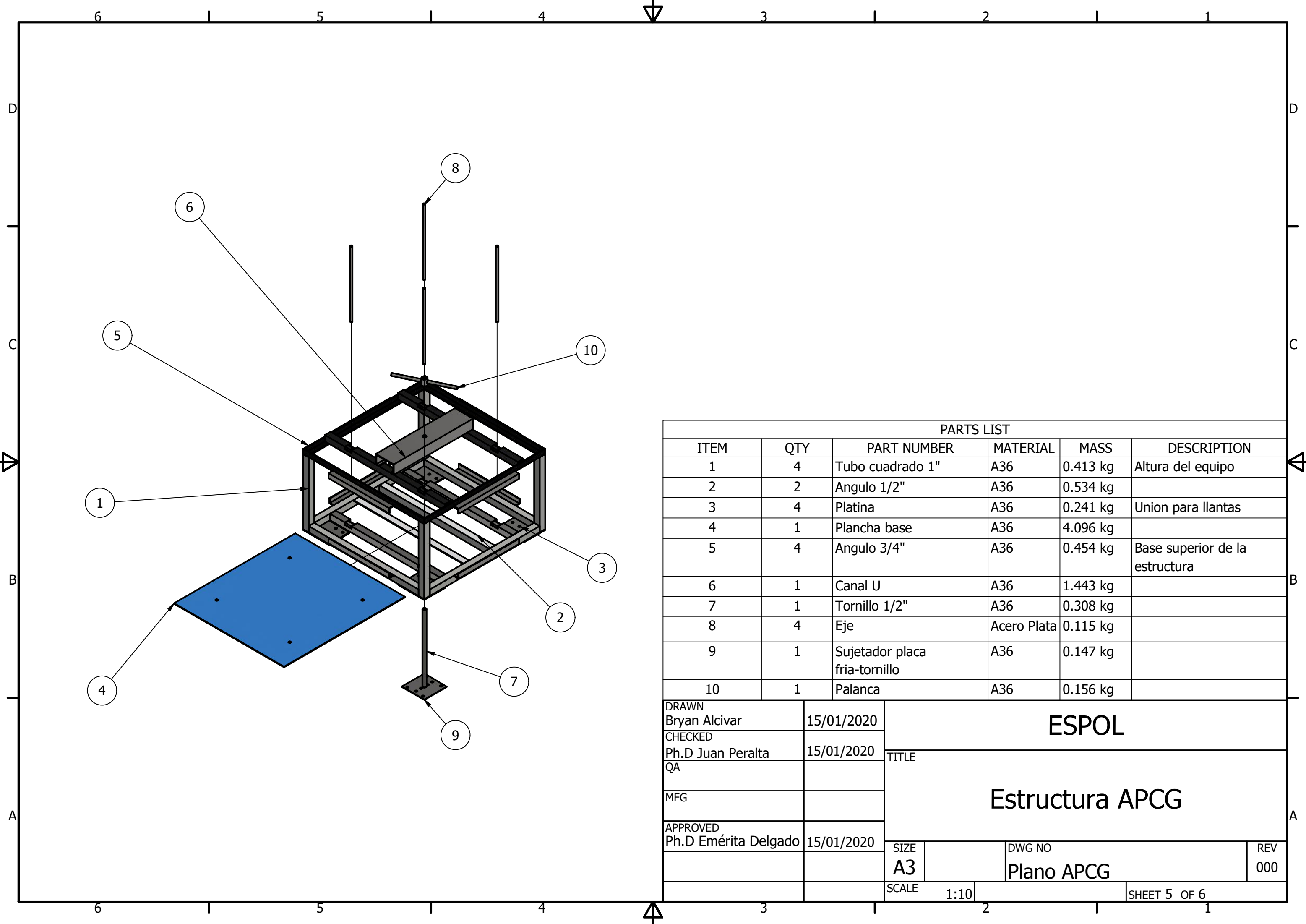
PLACA CALIENTE

PLACA FRIA

SERPETIN

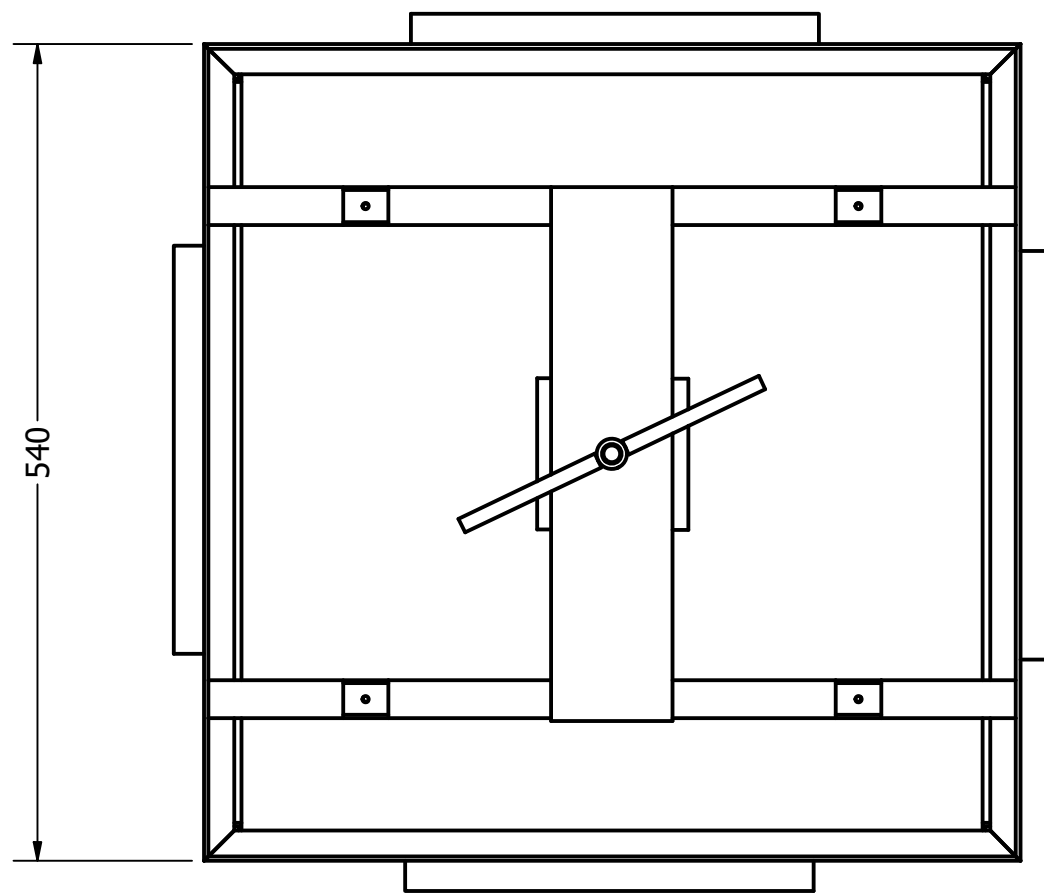


DRAWN Bryan Alcivar		15/01/2020		ESPOL	
CHECKED Ph.D Juan Peralta		15/01/2020			
QA				TITLE	
MFG				Dimensiones de Placa caliente, Placa fría y Serpentín	
APPROVED Ph.D Emérita Delgado		15/01/2020		SIZE	DWG NO
				A3	Plano placas
				SCALE	REV
				1:5	000
				SHEET 4 OF 6	

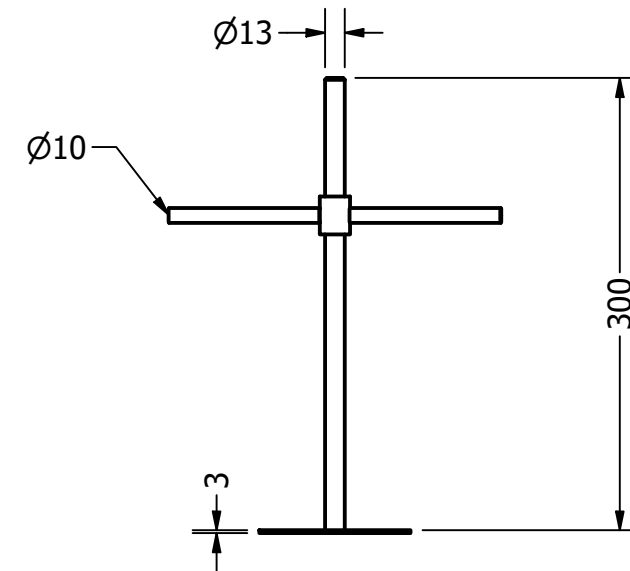


PARTS LIST					
ITEM	QTY	PART NUMBER	MATERIAL	MASS	DESCRIPTION
1	4	Tubo cuadrado 1"	A36	0.413 kg	Altura del equipo
2	2	Angulo 1/2"	A36	0.534 kg	
3	4	Platina	A36	0.241 kg	Union para llantas
4	1	Plancha base	A36	4.096 kg	
5	4	Angulo 3/4"	A36	0.454 kg	Base superior de la estructura
6	1	Canal U	A36	1.443 kg	
7	1	Tornillo 1/2"	A36	0.308 kg	
8	4	Eje	Acero Plata	0.115 kg	
9	1	Sujetador placa fria-tornillo	A36	0.147 kg	
10	1	Palanca	A36	0.156 kg	

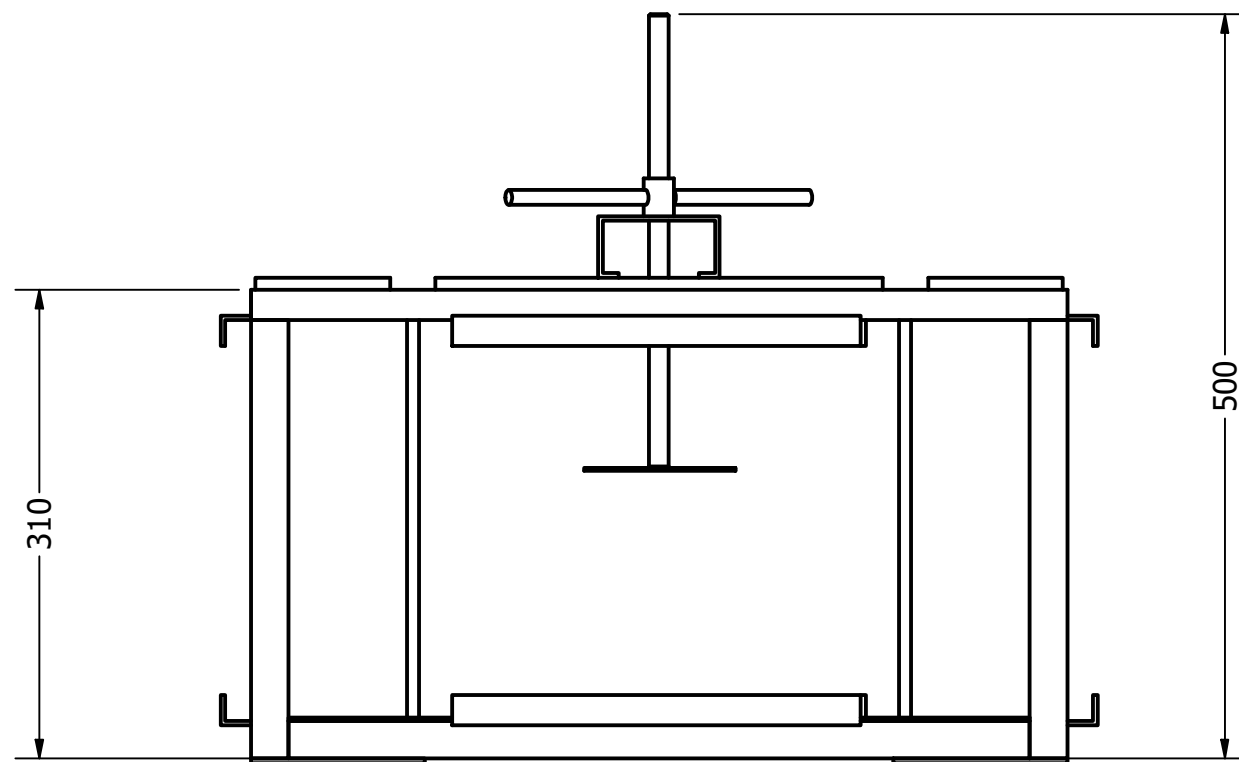
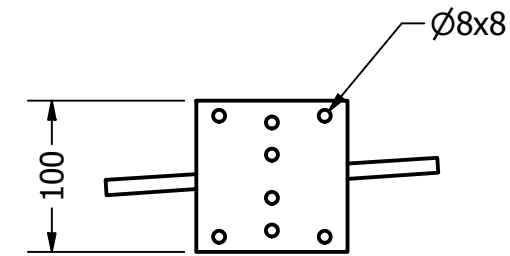
DRAWN Bryan Alcivar		15/01/2020	ESPOL Estructura APCG		
CHECKED Ph.D Juan Peralta		15/01/2020			
QA					
MFG					
APPROVED Ph.D Emérita Delgado		15/01/2020	Plano APCG		
			SIZE A3	DWG NO Plano APCG	REV 000
			SCALE 1:10	SHEET 5 OF 6	



Vista superior



Tornillo de potencia



Vista lateral

DRAWN Bryan Alcivar	15/01/2020	ESPOL		
CHECKED Ph.D Juan Peralta	15/01/2020			
QA		Dimensión estructura APCG		
MFG				
APPROVED Ph.D Emérita Delgado	15/01/2020	SIZE A3	DWG NO Plano general APCG	REV 000
		SCALE 1:5	SHEET 6 OF 6	

APÉNDICE B

-

MANUAL DE OPERACIÓN DEL APARATO DE PLACA CALIENTE CON GUARDA (APCG)

B.1 Preparación del equipo APCG.

Al inicio se verifica que el equipo se encuentre sobre una superficie rígida, a una altura que permita visualizar el interior del mismo de manera cómoda y segura. Una vez que se ha definido el espacio se procede a asegurar las ruedas para mantener fijo el equipo.

Se revisa que ningún elemento se encuentre fuera de lugar, ya sea un cable, termopar o la tubería. De igual manera se debe asegurar que los mismos se encuentren debidamente aislados. Luego de haber inspeccionado todos los elementos previos se identifica la fuente de poder a la cual estará conectado el equipo durante toda la prueba.

B.2 Preparación de la Placa Fría

Previo al ensayo, se limpia la superficie de la placa con alcohol para eliminar cualquier rastro de polvo o impureza. Se observa que la tubería de cobre se encuentre en contacto con la placa y que el reservorio de refrigerante o la tubería no posean alguna fuga.

De igual manera, se verifica que los sensores de temperatura se encuentren ubicados correctamente en la placa fría y que funcionen adecuadamente. Una vez colocada la muestra entre la placa fría y caliente, se procede a bajar la placa fría con el tornillo de potencia hasta que esté en contacto con la muestra.

Se verifica si la distancia entre la placa caliente y fría tiene el mismo valor que el espesor de la muestra, si cumple esto, se enciende la bomba para empezar la circulación del refrigerante y el equipo para empezar la toma de datos de temperatura de la placa fría.

B.3 Preparación de la Placa Caliente

Antes de colocar la muestra en la placa caliente, se limpia superficie con alcohol para evitar cualquier material ajeno a la muestra. Después se revisa si la conexión de la resistencia eléctrica plana está conectada a su fuente de poder, y se verifica si las termocuplas de la placa caliente están en contacto con la superficie de la misma, en caso de que alguna esté desubicada, se coloca nuevamente en su sitio.

Una vez colocada la muestra se procede a encender la fuente de poder, y se elige el valor de la temperatura a la que se quiere llegar la placa caliente. El ensayo inicia cuando la placa caliente llega hasta dicha temperatura.

B.4 Preparación de la muestra de análisis.

La muestra es un factor de importancia para el ensayo, por eso se tiene que considerar ciertos aspectos, antes de iniciar el ensayo. Primero se verifica que la muestra en ambos lados sea plana y homogénea en toda el área de contacto con la placa fría y caliente.

Se verifica si la muestra cumple con las dimensiones de la norma ASTM C-177, midiendo el espesor y la longitud característica de la muestra. Si cumple, se procede a colocar dicha muestra en el centro de la placa caliente y se baja la placa fría hasta quedar en contacto con la misma. Y está listo para empezar el ensayo.

B.5 Procedimiento para pruebas en el APCG

Con la finalidad de obtener el valor experimental de conductividad térmica de un material, se siguieron una serie de pasos detallados más adelante.

Antes de iniciar el ensayo se debe preparar el equipo y la muestra por analizar. Se asegura la planicie de la superficie de sus caras y que las dimensiones sean acordes al espesor de la muestra. Se registran los datos de espesor (L) y área (A) promedio medidos con un Vernier en el formato establecido.

Adicionalmente, se determina el gradiente de temperatura (ΔT) entre la temperatura de la placa fría (T_f) y de la placa caliente (T_c).

Luego, con los datos obtenidos se calcula la conductividad térmica (k) de la muestra aplicando la ley de Fourier como se muestra en la ecuación de trabajo B.5.1. Estos valores se promedian para obtener la conductividad térmica aparente o experimental de la muestra.

Ecuación de trabajo

$$\bar{k} = \frac{L Q}{A (T_c - T_f)} \pm \varepsilon_k \quad (\text{B.5.1})$$

Dónde:

- L: Espesor promedio de la muestra [m]
- Q: Flujo de calor [W]
- A: Área promedio de medición de sección transversal [m²]
- T_c: Temperatura promedio de superficie de placa caliente [°C]
- T_f: Temperatura promedio de superficie de placa fría [°C]
- \bar{k} : Conductividad térmica aparente de la muestra [W/m. K]
- ε_k : Incertidumbre total de conductividad térmica [W/m. K]

APÉNDICE C

-

DISEÑO DEL APARATO DE PLACA CALIENTE CON GUARDA (CÁLCULOS)

C.1. Cálculo de Tornillo de potencia.

Está compuesto por una barra roscada M13, de acero inoxidable que tiene una resistencia a la tracción de 235 MPa. Se decidió un roscado a la derecha. Para determinar si el diámetro elegido no falle a esfuerzos combinados se realizó los cálculos correspondientes al tornillo de potencia.

La carga a la cual está sometido cada tornillo está dada por la ecuación C.1.1.

$$P=F \quad (\text{C.1.1})$$

Dónde:

- F : es la carga que está sometida la placa caliente. [N]
- P : es la carga a la cual está sometido los tornillos de potencia. [N]

Se tiene que encontrar un factor de seguridad mayor a 1, este factor nos asegura que nuestro equipo no falle mientras opera con las condiciones determinadas anteriormente, este factor es igual a la ecuación C.1.2.

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (\text{C.1.2})$$

Dónde:

- S_y : es la resistencia a la tracción del material del que está hecho el perno. [MPa]
- σ' : esfuerzo de Von Misses o combinado. [MPa]

En los tornillos existen dos esfuerzos, a tensión y cortante. Combinados se los conoce como esfuerzo de Von Misses, el cual se determinó con la ecuación C.1.3.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (\text{C.1.3})$$

Dónde:

- σ : esfuerzo a tensión. [Pa]
- τ : esfuerzo cortante. [Pa]

Cada uno de estos esfuerzos se lo determinó con la ecuación C.1.4 y C.1.5, respectivamente, ambas ecuaciones dependen del diámetro de tornillo de potencia.

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d_r^2} \quad (\text{C.1.4})$$

Dónde:

- P: Es la carga a la cual está sometida cada tornillo del APCG. [N]
- dr: es el diámetro del tornillo de potencia. [m]

$$\tau = \frac{T}{\pi \frac{d_r^4}{32}} \quad (\text{C.1.5})$$

Dónde:

- T: torque generado en el tornillo de potencia. [N.m]

Se calculó el torque de subida y de bajada que se necesita para desplazar la placa fría. El tornillo adquirido por el cliente es ACME, con la tabla 11-3 del libro Diseño de Máquinas cuarta edición, la cual corresponde a especificaciones de tornillos ACME, se determinó el paso, diámetro primitivo, el ángulo de avance, y se procedió a determinar el torque de subida con la ecuación C.1.6.

$$T_{su} = \frac{P d_p}{2} \left[\frac{\pi \mu d_p + L \cos \alpha}{\pi d_p \cos \alpha - \mu L} \right] + \mu_c P \frac{d_c}{2} \quad (\text{C.1.6})$$

Dónde:

- P: Carga total que tiene que desplazar el tornillo. [N]
- d_p : Diámetro primitivo del tornillo M13. [m]
- μ : Coeficiente de fricción del tornillo.
- L: Avance del tornillo. [m]
- α : Ángulo de avance del tornillo. [°]
- μ_c : Coeficiente de fricción del collarín.
- d_c : Diámetro del collarín. [m]

Para determinar el torque necesario de bajada de nuestro equipo, está dada por la ecuación C.1.7

$$T_D = \frac{P d_p}{2} \left[\frac{\pi \mu d_p - L \cos \alpha}{\pi d_p \cos \alpha + \mu L} \right] + \mu_c P \frac{d_c}{2} \quad (\text{C.1.7})$$

Donde todos sus términos han sido definidos en la ecuación C.1.6.

Con el diseño detallado de la placa fría en Inventor Autodesk 2020 se determinó la masa del mismo, la cual fue de 5,961 Kg, y se sumó un 30% del mismo considerando como líquido refrigerante, dando una masa final de 6,557 Kg. Al usar la ecuación C.1.6 y C.1.7 se encontró el torque de subida y bajada, donde se consideró el diámetro del tornillo dado por el cliente, M13.

$$T_{su} = \frac{Pd_p}{2} \left[\frac{\pi \mu d_p + L \cos \alpha}{\pi d_p \cos \alpha - \mu L} \right] + \mu_c P \frac{d_c}{2} \quad (\text{C.1.6})$$

$$T_{su} = \frac{(64,33)(11,89 \times 10^{-3})}{2} \left[\frac{\pi(0,15)(11,89 \times 10^{-3}) + (1,5 \times 10^{-3}) \cos 14,52}{\pi(11,89 \times 10^{-3}) \cos 14,52 - (0,15)(1,5 \times 10^{-3})} \right] + (0,15)(64,33) \frac{(25,4 \times 10^{-3})}{2}$$

$$\mathbf{T_{su} = 0,19 Nm}$$

$$T_D = \frac{Pd_p}{2} \left[\frac{\pi \mu d_p - L \cos \alpha}{\pi d_p \cos \alpha + \mu L} \right] + \mu_c P \frac{d_c}{2} \quad (\text{C.1.7})$$

$$T_D = \frac{(64,33)(11,89 \times 10^{-3})}{2} \left[\frac{\pi(0,15)(11,89 \times 10^{-3}) - (1,5 \times 10^{-3}) \cos 14,52}{\pi(11,89 \times 10^{-3}) \cos 14,52 + (0,15)(1,5 \times 10^{-3})} \right] + (0,15)(64,33) \frac{(25,4 \times 10^{-3})}{2}$$

$$\mathbf{T_D = 0,16 Nm}$$

Al introducir las ecuaciones C.1.4 y C.1.5 en la ecuación C.1.3, se determinó el esfuerzo de Von Misses.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (\text{C.1.3})$$

$$\sigma' = \sqrt{\left(\frac{4(64,33)}{\pi(0,013)^2} \right)^2 + 3 \left(\frac{32(0,19)}{\pi(0,013)^4} \right)^2} = \mathbf{117,37 \times 10^6}$$

Finalmente usando la ecuación C.1.2, se determinó el factor de seguridad, considerando la resistencia a la fluencia de 235 Mpa del acero inoxidable.

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (\text{C.1.2})$$

$$\mathbf{\eta = \frac{235 \times 10^6}{117,37 \times 10^6} = 2}$$

C.2. Cálculo para Intercambiador de calor en la placa fría.

Se realizó el diseño del sistema de enfriamiento para lograr mantener una variación de temperatura de 20K entre la temperatura de superficie para la placa fría y para la placa caliente.

$$q_i = Ak \frac{\Delta T}{I_i} \quad (C.2.1)$$

Dónde:

- q_i : Flujo de calor en la iteración i. [KW]
- A : Área de la placa fría. [0,071 m²]
- k : Conductividad térmica del aluminio. [244 W/mK]
- ΔT : Variación de temperatura permitida por norma. [20K]
- I_i : Distancia entre espira del intercambiador de calor. [m]

Como se realiza el ensayo por 30 minutos, se determinó el calor liberada con la ecuación C.2.2

$$Q_i = q_i * t \quad (C.2.2)$$

Dónde:

- Q_i : Calor liberado [KJ]
- t : Tiempo de ensayo. [s]

Luego se determinó el flujo másico que nos proporciona la bomba con la ecuación C.2.3.

$$\dot{m} = \rho Q \quad (C.2.3)$$

Dónde:

- \dot{m} : Flujo másico del refrigerante. [Kg/s]
- ρ : Densidad del refrigerante. [Kg/m³]
- Q : Caudal de la bomba. [m³/s]

Finalmente, con el calor específico del refrigerante, se calculó la variación de temperatura que existe en el intercambiador de calor durante el tiempo del ensayo con la ecuación C.2.4.

$$\Delta T = \frac{Q_i}{\dot{m}tC_p} \quad (\text{C.2.4})$$

Dónde:

- ΔT : Variación de temperatura en el intercambiador de calor. [K]
- C_p : Calor específico del refrigerante. [KJ/KgK]

Con el diseño detallado se comparó la separación entre cada espira en tres distintas posiciones, las cuales fueron 20, 30 y 50 mm, y se obtuvo los siguientes resultados mostrados en la tabla C.2.1.

Tabla C.2.1 Componentes del equipo APCG.

Fuente: [Elaboración Propia]

I_i [m]	q_i [KW]	Q_i [KJ]	\dot{m} [Kg/s]	ΔT [K]
0,02	17,32	31183,2	0,083	50,10
0,03	11,55	20788,2	0,083	33,40
0,05	6,93	12474	0,083	20,04

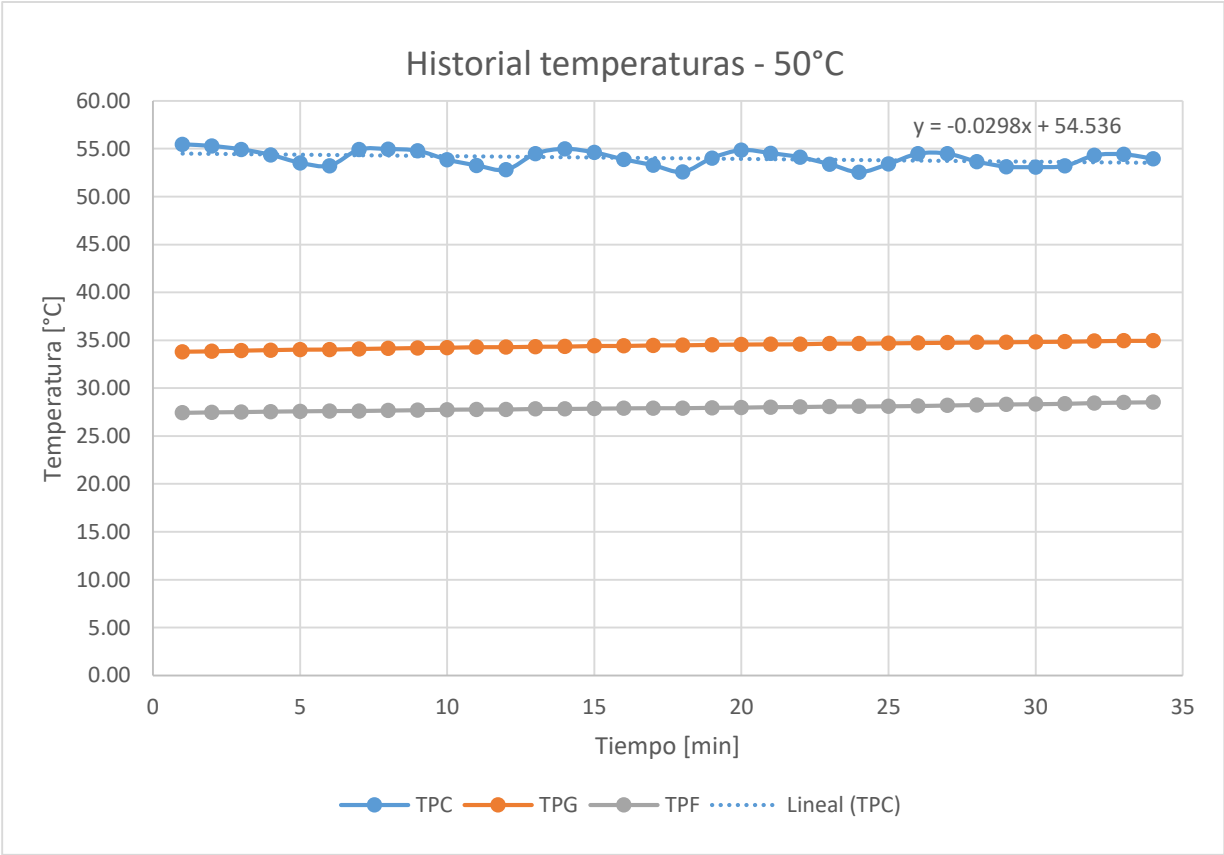
APÉNDICE D

-

RESULTADOS DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA UNA MUESTRA DESCONOCIDA DE PANEL PREFABRICADO.

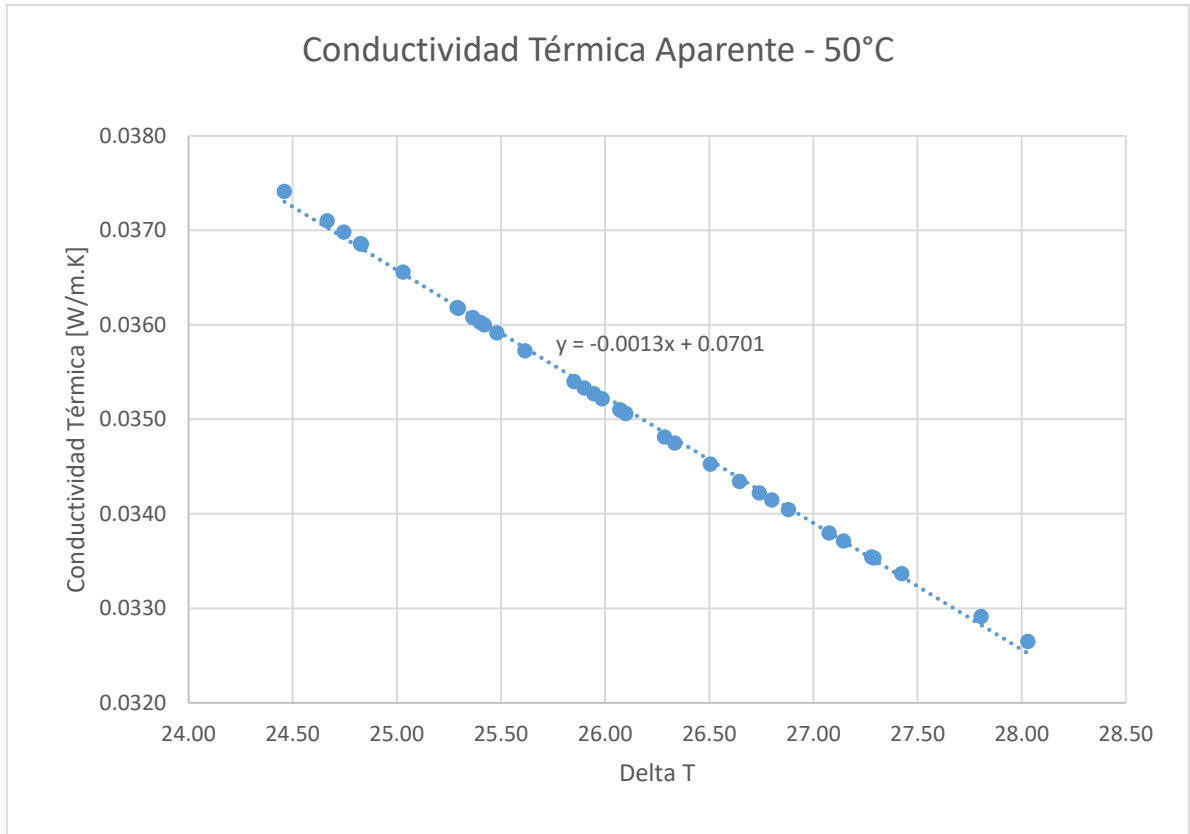
D.1. Datos medidos en el equipo APCG

Se realizó una primera prueba configurando la temperatura de la resistencia térmica a 50°C, a la cual se mantuvo durante toda la prueba.



Gráfica D.1. 1 Histórico de las temperaturas durante el ensayo a 50°C.

Fuente: [Elaboración propia].



Gráfica D.1. 2 Histórico de conductividad térmica aparente durante el ensayo a 50°C.

Fuente: [Elaboración propia].

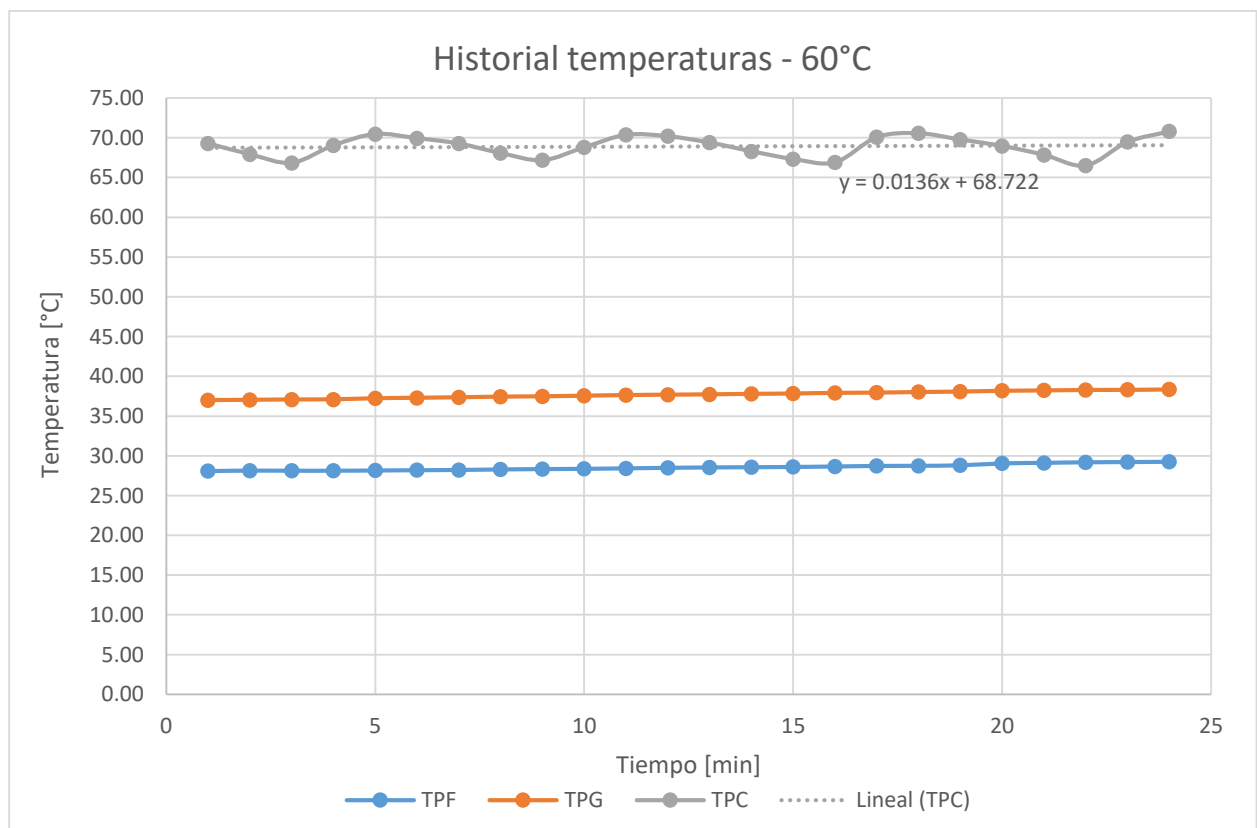
Tabla D.1. 1 Datos obtenidos durante ensayo con temperatura de resistencia a 50°C.

Fuente: [Elaboración propia].

Flujo de calor [W]		72	Temperatura SET		50
Área superficie [m ²]		0.034225	Resistencia [°C]		
Espesor muestra [m]		0.0435			
T [min]	TPF [°C]	TPG [°C]	TPC [°C]	ΔT	K aparente [W/m.K]
1	27.42	33.8	55.45	28.03	0.03265
2	27.47	33.84	55.28	27.81	0.03291
3	27.5	33.91	54.93	27.43	0.03337
4	27.55	33.97	54.35	26.80	0.03415
5	27.58	34.02	53.53	25.95	0.03527
6	27.61	34.03	53.23	25.62	0.03573
7	27.62	34.09	54.90	27.28	0.03355
8	27.66	34.14	54.95	27.29	0.03353
9	27.7	34.19	54.78	27.08	0.03380
10	27.75	34.22	53.85	26.10	0.03506
11	27.77	34.28	53.25	25.48	0.03592
12	27.77	34.28	52.80	25.03	0.03656
13	27.83	34.33	54.48	26.65	0.03434
14	27.83	34.34	54.98	27.15	0.03371
15	27.86	34.41	54.60	26.74	0.03422
16	27.89	34.41	53.88	25.99	0.03522
17	27.91	34.47	53.28	25.37	0.03608
18	27.91	34.48	52.58	24.67	0.03710
19	27.95	34.53	54.03	26.08	0.03510
20	27.97	34.56	54.85	26.88	0.03404
21	28.02	34.58	54.53	26.51	0.03453
22	28.03	34.59	54.10	26.07	0.03510
23	28.08	34.66	53.38	25.30	0.03618
24	28.09	34.66	52.55	24.46	0.03741

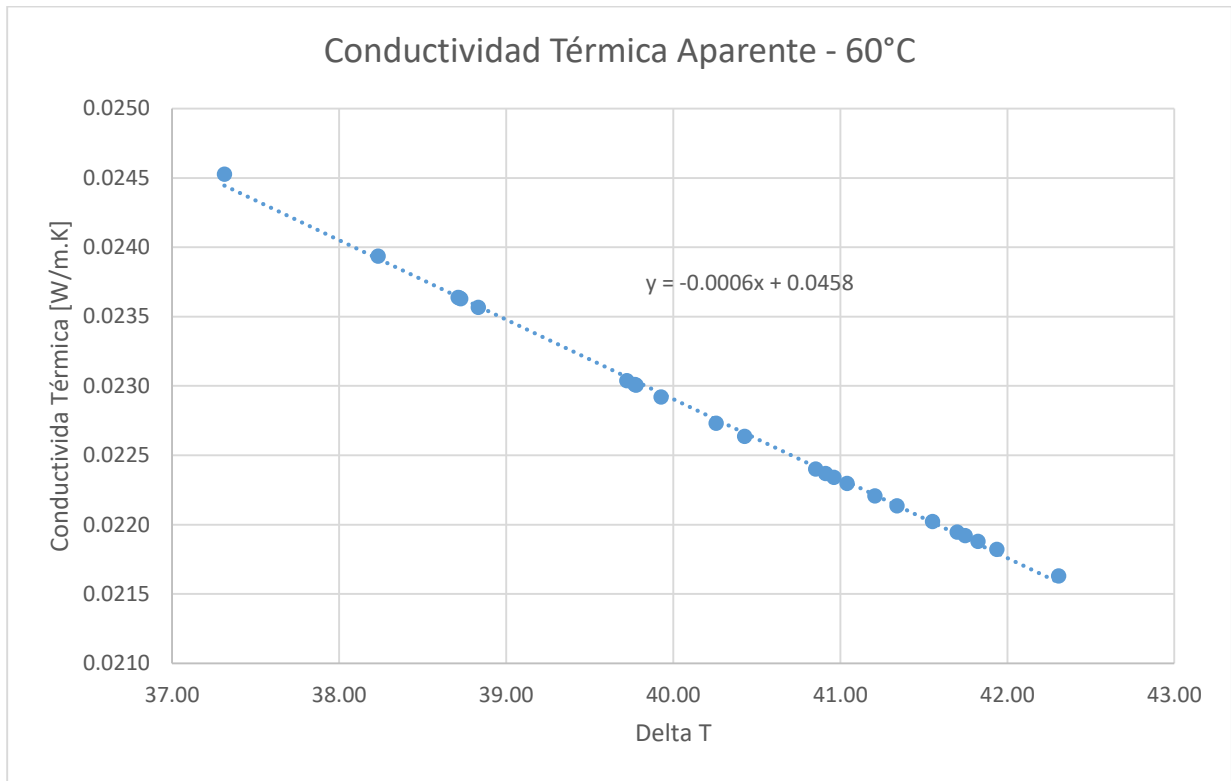
25	28.11	34.69	53.40	25.29	0.03619
26	28.14	34.72	54.48	26.34	0.03475
27	28.19	34.75	54.48	26.29	0.03482
28	28.25	34.78	53.65	25.40	0.03603
29	28.3	34.8	53.13	24.83	0.03686
30	28.33	34.84	53.08	24.75	0.03698
31	28.37	34.86	53.20	24.83	0.03686
32	28.45	34.91	54.30	25.85	0.03540
33	28.5	34.95	54.40	25.90	0.03533
34	28.53	34.95	53.95	25.42	0.03600
PROMEDIO	27.94	34.44	54.02	26.08	<u>0.0351</u>

Se realizó una segunda prueba configurando la temperatura de la resistencia térmica a 60°C, a la cual se mantuvo durante toda la prueba.



Gráfica D.1. 3 Histórico de las temperaturas durante el ensayo a 60°C.

Fuente: [Elaboración propia].



Gráfica D.1. 4 Histórico de conductividad térmica aparente durante el ensayo a 60°C.

Fuente: [Elaboración propia].

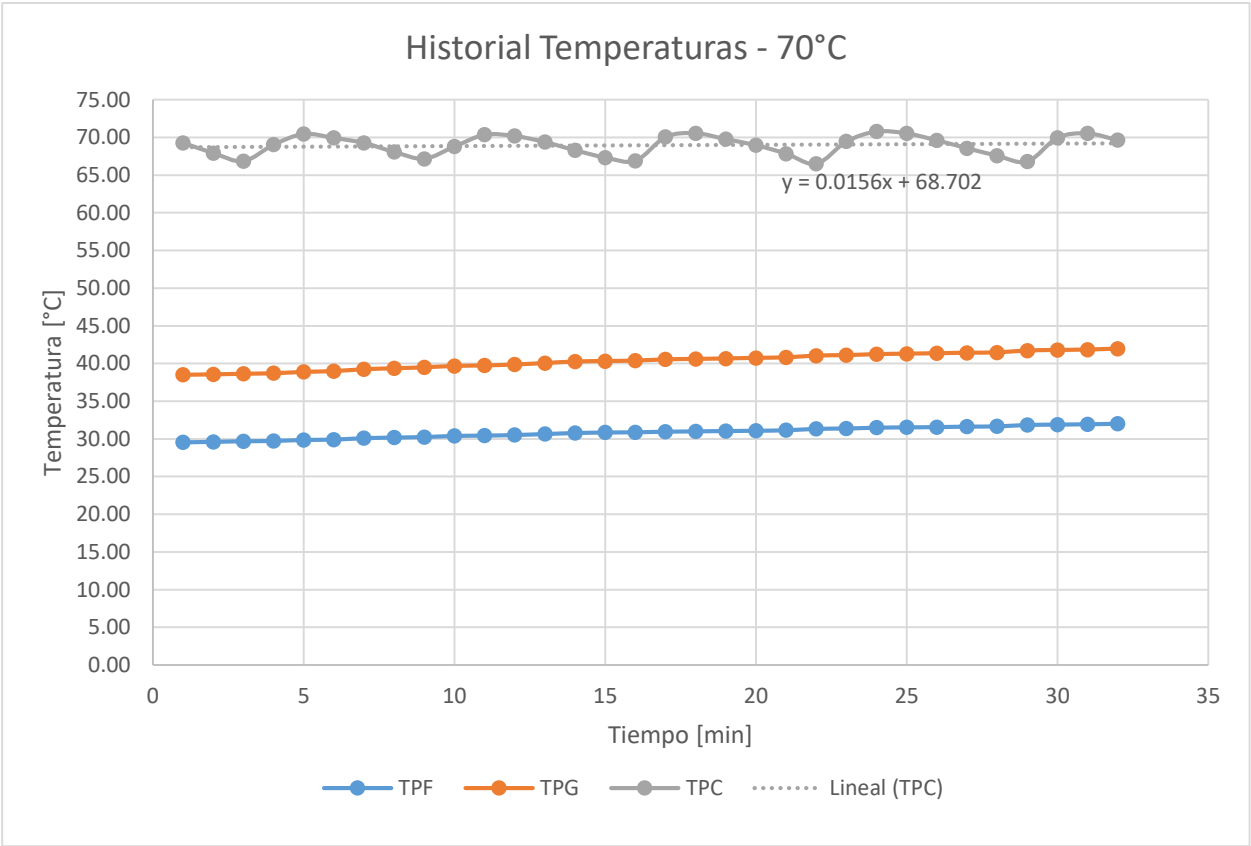
Tabla D.1. 2 Datos obtenidos durante ensayo con temperatura de resistencia a 50°C.

Fuente: [Elaboración propia].

Flujo de calor [W]		72	Temperatura SET		60
Área superficie [m ²]		0.034225	Resistencia [°C]		
Espesor muestra [m]		0.0435			
T [min]	TPF [°C]	TPG [°C]	TPC [°C]	ΔT	K aparente [W/m.K]
1	28.09	37.00	69.30	41.21	0.02221
2	28.16	37.03	67.93	39.77	0.02301
3	28.14	37.08	66.85	38.71	0.02364
4	28.14	37.10	69.05	40.91	0.02237
5	28.17	37.24	70.48	42.31	0.02163
6	28.20	37.30	69.95	41.75	0.02192
7	28.24	37.36	69.28	41.04	0.02230
8	28.30	37.44	68.08	39.78	0.02301

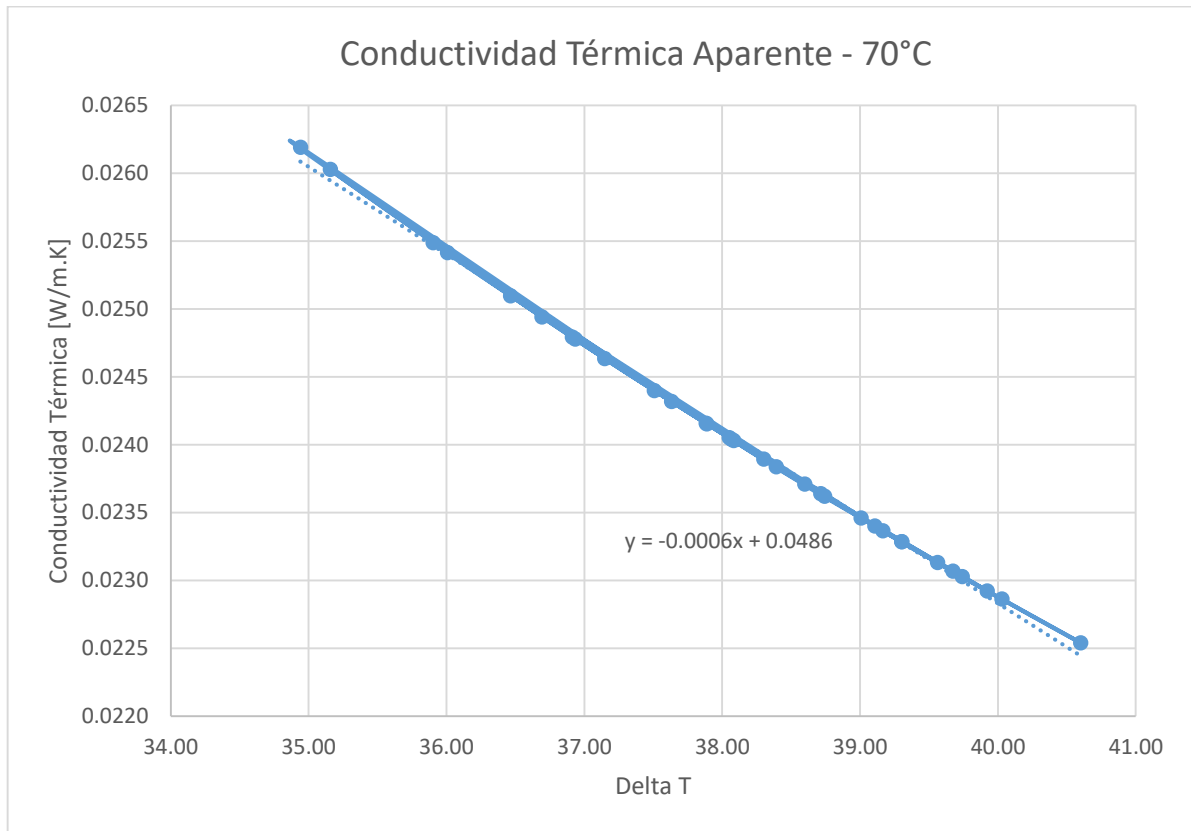
9	28.34	37.49	67.18	38.83	0.02357
10	28.37	37.56	68.80	40.43	0.02264
11	28.44	37.65	70.38	41.94	0.02182
12	28.50	37.69	70.20	41.70	0.02195
13	28.55	37.74	69.40	40.85	0.02240
14	28.58	37.80	68.30	39.72	0.02304
15	28.61	37.84	67.33	38.72	0.02364
16	28.67	37.93	66.90	38.23	0.02394
17	28.74	37.96	70.08	41.34	0.02214
18	28.75	38.03	70.58	41.83	0.02188
19	28.81	38.09	69.78	40.96	0.02234
20	29.05	38.19	68.98	39.93	0.02292
21	29.12	38.24	67.85	38.73	0.02363
22	29.19	38.30	66.50	37.31	0.02453
23	29.22	38.31	69.48	40.26	0.02273
24	29.25	38.36	70.80	41.55	0.02202
PROMEDIO	28.57	37.70	68.89	40.33	<u>0.02269</u>

Se realizó una tercera prueba configurando la temperatura de la resistencia térmica a 70°C, a la cual se mantuvo durante toda la prueba.



Gráfica D.1. 5 Histórico de las temperaturas durante el ensayo a 70°C.

Fuente: [Elaboración propia].



Gráfica D.1. 6 Histórico de conductividad térmica aparente durante el ensayo a 60°C.

Fuente: [Elaboración propia].

Tabla D.1. 3 Datos obtenidos durante ensayo con temperatura de resistencia a 50°C.

Fuente: [Elaboración propia].

Flujo de calor [W]		72	Temperatura SET		70
Área superficie [m ²]		0.034225	Resistencia [°C]		
Espesor muestra [m]		0.0435			
T [min]	TPF [°C]	TPG [°C]	TPC [°C]	ΔT	K aparente [W/m.K]
1	29.56	38.52	69.30	39.74	0.02303
2	29.63	38.58	67.93	38.30	0.02389
3	29.70	38.66	66.85	37.15	0.02463
4	29.75	38.72	69.05	39.30	0.02328
5	29.88	38.91	70.48	40.60	0.02254
6	29.92	39.00	69.95	40.03	0.02286

7	30.11	39.25	69.28	39.17	0.02337
8	30.19	39.38	68.08	37.89	0.02415
9	30.26	39.50	67.18	36.91	0.02479
10	30.41	39.69	68.80	38.39	0.02384
11	30.45	39.75	70.38	39.92	0.02292
12	30.53	39.88	70.20	39.67	0.02307
13	30.66	40.07	69.40	38.74	0.02362
14	30.79	40.27	68.30	37.51	0.02440
15	30.86	40.33	67.33	36.47	0.02510
16	30.89	40.39	66.90	36.01	0.02541
17	30.97	40.55	70.08	39.11	0.02340
18	31.01	40.61	70.58	39.56	0.02313
19	31.06	40.67	69.78	38.72	0.02364
20	31.09	40.75	68.98	37.88	0.02416
21	31.16	40.82	67.85	36.69	0.02494
22	31.34	41.05	66.50	35.16	0.02603
23	31.39	41.11	69.48	38.08	0.02403
24	31.50	41.24	70.80	39.30	0.02328
25	31.54	41.30	70.55	39.01	0.02346
26	31.58	41.36	69.63	38.05	0.02405
27	31.64	41.42	68.58	36.93	0.02478
28	31.67	41.47	67.58	35.90	0.02549
29	31.86	41.72	66.80	34.94	0.02619
30	31.91	41.79	69.98	38.07	0.02404
31	31.95	41.85	70.55	38.60	0.02371
32	32.02	41.97	69.65	37.63	0.02432
PROMEDIO	30.85	40.33	68.96	38.11	<u>0.02405</u>

D.2 Fotografías de la medición



Figura E.2. 1 Vista del equipo APCI durante la medición.

Fuente: [Elaboración propia].



Figura E.2. 2 Vista de la muestra de panel prefabricado.

Fuente: [Elaboración propia].

D.3 Reporte de prueba de conductividad térmica.

Reporte de prueba <i>Conductividad térmica</i>	
Fecha: 20 de enero del 2020	Número de Prueba: 1
Operador: Diana Quizhpi	Duración de prueba: 180 min
<u>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA</u>	
Identificación: Kutermico wall SF 40 PIR	
Características: Muestra cuadrada de polisocianurato	
Dimensiones: 185x195x43,5 mm	
Nota: No es regular en el área de contacto de la muestra y no está bajo norma.	
<u>DESCRIPCIÓN DEL APARATO</u>	
Aparato de placa caliente con guarda de lado simple de medición y paredes aislantes. (APCG – 001-2019)	
Orientación de los platos: Horizontal	
Modo de operación: Medición de lado simple	
Procedimiento de prueba: ASTM C177-97	
Nota:	
<u>RESULTADOS EXPERIMENTALES</u>	
Variable	Valor Promedio
Flujo de calor (Q) [W]	0.72
Corriente [A]	0.03
Voltaje [V]	24
Temperatura en la placa fría (T_f) [°C]	29.12
Temperatura en la placa caliente (T_c) [°C]	63.96
Área de medición de la muestra (A) [m ²]	0,034225
Espesor de la muestra (L) [m]	0,0435
Conductividad térmica aparente (\bar{k}) [W/m. K]	0,02727
Observaciones: El ensayo se realizó sin las paredes aislantes y el error dado por el fabricante de la muestra es del 7%.	

