

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE MEDICION DE LA
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE MATERIALES DE EDIFICACIÓN
SEGÚN LA NORMA ASTM C1043**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,
que presenta el bachiller:

ARTURO MANUEL VIZCARRA SOTO

ASESOR: ING. ENRIQUE BARRANTES PEÑA

Lima, mayo del 2016

RESUMEN

La industria peruana ha prestado poca atención, a pesar de la relación directa entre el ahorro energético y ahorro económico. El diseño de este dispositivo no solamente tiene como fin la validación de valores para diferentes materiales usados en edificación, sino también puede ayudar a la investigación nuevos materiales, por ejemplo, compuestos de las cuales se quiera saber su comportamiento térmico.

Siendo el propósito de la presente tesis, en el área de energía, diseño y selección de los componentes de un dispositivo de acuerdo a la norma ASTM C1043 que permita ensayar materiales usados en edificación para la obtención de las propiedades térmicas, siendo la más conocida la conductividad térmica. Se considera en el diseño la colocación de dos muestras de hasta 30 kg. El diseño se realizó según la metodología de diseño DIN VDI 2221, la norma base usada para el desarrollo de la presente tesis ASTM C1043 y la norma general de la cual se desprende ésta última que es la norma ASTM C177. Así también, para los casos donde no se tenía información alguna en las normas antes mencionadas, se hizo uso de la norma UNE EN 12664. Por otra parte, se consideró los conocimientos en diseño mecánico como elementos de máquinas, transferencia de calor y resistencia de materiales; además, de conocimiento de manufactura disponible en el mercado peruano, utilización de programas CAD y simulación por el método de elementos finitos.

Al final, se obtuvo el diseño del dispositivo que base su principio en el método de la placa caliente con guarda para dos muestras cuyo rango de funcionamiento va desde la temperatura de ambiente (23°C) hasta 65°C aproximadamente según norma, y con dimensiones generales de la máquina de 400x400x552 milímetros de largo, ancho y alto respectivamente. El presupuesto final del equipo es de S/. 22280 Nuevos Soles.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO	DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE MATERIALES DE EDIFICACIÓN SEGÚN LA NORMA ASTM C1043
ÁREA	Energía $\# 385$
PROPUESTO POR	Ing. Enrique J. Barrantes P.
ASESOR	Ing. Enrique J. Barrantes P.
TESISTA	Arturo Manuel Vizcarra Soto
CÓDIGO	2008-0284
FECHA	7 de octubre de 2015



DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Dentro del contexto actual relacionado con el uso racional de los recursos, entre ellos la energía y dado que un rubro muy importante es el consumo de energía de las viviendas y edificaciones en general, es que las especificaciones de las propiedades térmicas de los materiales de edificación son fundamentales para establecer un adecuado consumo energético derivado principalmente de los sistemas de climatización en general, calefacción en invierno y aire acondicionado (enfriamiento) en verano.

Es por ello que se plantea como objetivo del presente trabajo el Diseño de un Dispositivo para determinar la Conductividad Térmica de materiales empleados en edificación basado en las indicaciones de la Norma ASTM C1043.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD
TÉRMICA DE MATERIALES DE EDIFICACIÓN SEGÚN
LA NORMA ASTM C1043

Introducción

1. Normativa y Conductividad Térmica
2. Diseño del dispositivo de medición de Conductividad Térmica
3. Selección de componentes
4. Presupuesto

Planos

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas

Ing. Enrique J. Barrantes P.
Asesor





DEDICATORIA

*Gracias a Dios,
a mis queridos padres y hermana, por su comprensión, cariño y apoyo incondicional.
Este trabajo va dedicado a ti papa y mamá, el objetivo que estoy logrando el día de hoy es
gracias a ustedes y este trabajo es un pequeño detalle con mucho cariño de parte mía, el
cual jamás compensará a todo lo que me brindaron.*



AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar al Ing. Enrique Barrantes por aceptarme como su asesorado, por su apoyo, tiempo y buena disposición a recibir mis consultas. En segundo lugar, agradezco a los profesores Allan Flores y Julio Sotomayor por apoyarme en todo momento. Así también, agradecer a algunos compañeros quienes me ayudaron en el desarrollo de la presente tesis: Renato Espinoza, Aldo Frías, Guillermo Moreno, Milenka Gamero, Alex Molinari, Víctor Paredes, Linder García, Hernán Infanzón y Fernando Arenas. Finalmente, agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Perú, mi casa de estudios, por brindarme todo lo necesario para ser un profesional y mejor persona.

INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
NORMATIVA Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	2
1.1 GENERALIDADES.....	2
1.1.1 La conductividad térmica y su importancia	2
1.1.2 El ahorro energético en el Perú	3
1.1.3 Características de los materiales de construcción en el Perú	6
1.2 APARATO DE PLACA CALIENTE CON GUARDA	11
1.2.1 El principio del método según la norma ASTM C 177	11
1.2.2 El aparato de placa caliente con guarda con calentador circular ASTM C1043 12	
1.2.3 Características de las muestras.....	14
1.2.3.1 Tratamiento de la muestra	14
1.2.3.2 Homogeneidad de la muestra	15
1.2.3.3 Espesor máximo de la muestra	16
1.2.3.4 Espesor mínimo de la muestra	16
1.2.3.5 Límites máximos para la resistencia térmica.....	17
1.2.3.6 Resistencia de contacto y planicie	17
1.2.3.7 Diferencia de temperatura a través de la muestra	18
1.2.3.8 Paralelismo.....	18
1.2.3.9 Límites de la diferencia de temperatura	18
1.2.3.10 Temperatura máxima de operación	18
1.2.3.11 Deformación	19
1.2.3.12 Tiempo establecido e intervalo de medida	19
DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	21
2.1 METODOLOGÍA Y CONCEPTO DE SOLUCIÓN	21
2.1.1 Lista de exigencias	21
2.1.2 Estructura de funciones	23
2.1.3 Conceptos de solución	25
2.1.4 Valoración técnico - económica	28

2.1.5	Concepto de solución óptimo.....	30
2.2	DIMENSIONES GENERALES.....	32
2.3	BARRAS ROSCADAS	36
2.3.1	Carga de trabajo.....	36
2.3.2	Características del roscado	38
2.3.3	Verificación del roscado inferior por la condición de pandeo.....	39
2.3.4	Verificación del roscado inferior por la condición de resistencia.....	40
2.3.5	Verificación de la tuerca por aplastamiento	42
2.3.6	Momento torsor total aplicado en el roscado inferior para elevar la carga.....	42
2.3.7	Momento torsor total aplicado en el roscado superior para elevar la carga....	43
2.3.8	Rendimiento mecánico en la elevación.....	43
2.3.9	Verificación de la barra roscada por fatiga.....	43
2.4.1	Verificación a la fatiga.....	47
2.4.2	Diámetro mínimo	48
2.4	SISTEMA DE ENGRANAJES	49
2.4.1	Resistencia a la fatiga por flexión en la raíz del diente.....	53
2.4.2	Resistencia a la fatiga por presión en el flanco del diente del piñón	54
2.5	SOPORTE DEL DISPOSITIVO	55
2.6.1	Verificación por resistencia del soporte.....	57
2.6.2	Verificación por rigidez del soporte	57
2.6.3	Verificación al pandeo del perfil tubular	59
2.6	SISTEMA DE MEDICIÓN	59
2.7.1	Placa de medición	60
2.7.1.1	Número de calentadores en la placa de medición	61
2.7.1.2	Ubicación del calentador lineal circular en la placa de medición	62
2.7.1.3	Distribución de la temperatura	62
2.7.2	Placa de guarda	64
2.7.2.1	Número de calentadores en la placa de guarda.....	65
2.7.2.2	Ubicación del calentador lineal circular en la placa de guarda	65
2.7.2.3	Dilatación térmica de la placa de guarda	66
2.7.3	Placas frías.....	67
2.7.3.1	Calor transferido por las placas	68

2.7.3.2	Flujo másico de agua requerido.....	69
2.7.4	Error y aislamiento en la medición de materiales.....	70
2.7.4.1	Error de borde	70
2.7.4.2	Aislamiento del aparato	71
2.7	SISTEMA DE CONTROL	72
2.8.1	Localización y distribución de los sensores de temperatura.....	73
2.8.2	Caracterización usando el control PID	74
2.8	EL DISPOSITIVO FINAL Y ENSAYO DE LAS MUESTRAS	77
2.8.1	Preparación del dispositivo	77
2.8.2	Preparación de la muestra.....	78
2.8.3	Realización del ensayo.....	78
	SELECCION DE COMPONENTES.....	80
3.1	SENSORES DE TEMPERATURA.....	80
3.2	CONTROLADOR DE TEMPERATURA	82
3.3	FUENTE DC.....	83
3.4	CINTA CALEFACTORA	84
3.5	RODAMIENTOS.....	85
3.6	CHAVETAS.....	86
	PRESUPUESTO	88
4.1	COSTO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL.....	89
4.2	COSTO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA DE TÉRMICO.....	89
4.3	COSTO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA DE MECÁNICO	90
4.4	COSTO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA MOTRIZ.....	92
4.5	COSTO DE DISEÑADOR	92
4.6	COSTO TOTAL DEL PROYECTO	92
4.7	JUSTIFICACIÓN DEL PRESUPUESTO	93
	CONCLUSIONES	95
	REFERENCIAS.....	97

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Descripción	unidades
A_g	: Área de guarda	mm ²
A_m	: Área de medición	mm ²
R_m	: Radio de área de medición	mm
R_g	: Radio de área de guarda	mm
D_s	: Distancia entre el área de medición y guarda	mm
δ_m	: Densidad del material	Kg/m ³
e_m	: Espesor del material	m
l_m	: Dimensión lineal del material	m
δ_p	: Densidad de la placa fría	Kg/m ³
e_p	: Espesor de la placa fría	m
l_p	: Dimensión lineal de la placa fría	m
F_1	: Carga de trabajo inferior	N
F_2	: Carga de trabajo superior	N
g	: Aceleración de la gravedad	m/s ²
L	: Longitud de la barra roscada	mm
d_3	: Diámetro de base	mm
m	: Longitud del apoyo	mm
d	: Diámetro nominal del apoyo	mm
σ_c	: Esfuerzo de compresión del tornillo	N/mm ²
λ	: Relación de esbeltez	
E	: Modulo de elasticidad del acero	N/mm ²
σ_{lim}	: Esfuerzo de compresión del tornillo	N/mm ²
FS	: Factor de seguridad para pandeo	
M_{t2}	: Momento tangencial de elevación de la carga inferior	N*mm
M_{t1}	: Momento tangencial de descenso de la carga superior	N*mm
d_2	: Diámetro primitivo	mm
P	: Paso de rosca	mm
β	: 15; Ángulo para roscas trapeciales	°

μ	: 0,1; Fricción para flancos que no reciben buen engrase	
d_s	: Promedio entre el diámetro base y primitivo	mm
τ	: Esfuerzo de corte en el tornillo	N/mm ²
σ_s	: Esfuerzo axial en la sección efectiva d_s	N/mm ²
σ_{eq}	: Esfuerzo equivalente en la sección efectiva d_s del tornillo	N/mm ²
σ_{adm}	: Esfuerzo admisible en el tornillo	N/mm ²
σ_B	: Esfuerzo máximo del acero	N/mm ²
p	: Esfuerzo por aplastamiento en los flancos de la tuerca	N/mm ²
h	: Paso aparente del tornillo	mm
n	: Número de entradas de la rosca	
H_1	: Profundidad portante de rosca	mm
m	: Longitud de la tuerca en el apoyo	m/s ²
M_{R2}	: Momento resistente en el apoyo debido a la carga inferior	N * mm
M_{T2}	: Momento total en el apoyo debido a la carga inferior	N * mm
M_{R1}	: Momento resistente en el apoyo debido a la carga superior	N * mm
M_{T1}	: Momento total en el apoyo debido a la carga superior	N * mm
u_R	: Coeficiente de fricción del apoyo	
D_m	: Diámetro del apoyo o rodamiento	mm
ρ	: Densidad del acero	Kg/mm ³
I	: Momento de inercia de la sección de la barra	mm ⁴
A_s	: Área correspondiente a d_s	mm ²
η	: Rendimiento mecánico	
M_{T3}	: Momento total resistente	N * mm
M_{B1}	: Momento flector debido a la carga superior	N * m
M_{B2}	: Momento flector debido a la carga inferior	N * m
σ_B	: Esfuerzo de flexión crítico	N/mm ²
σ_T	: Esfuerzo de tensión crítico	N/mm ²
τ	: Esfuerzo de torsión crítico	N/mm ²
τ_S	: Esfuerzo de corte crítico	N/mm ²
β_f	: Factor de concentración de esfuerzos	
C_t	: Coeficiente de tamaño	

C_S	: Coeficiente por acabado superficial	
C_{temp}	: Factor de temperatura	
σ_{faALT}	: Esfuerzo de flexión alternante del acero	N/mm ²
τ_{faPUL}	: Esfuerzo de torsión pulsante del acero	N/mm ²
α_0	: Factor de corrección para el diseño de arboles	
σ_{eqa}	: Esfuerzo equivalente en la sección del árbol	N/mm ²
σ_{faAdm}	: Esfuerzo admisible en la sección del árbol	N/mm ²
FS_a	: Factor de seguridad recomendado para el árbol	
d_{min}	: Diámetro de mínimo en la sección del árbol	mm
m_n	: Módulo normalizado según DIN780	mm
α_n	: Angulo de presión normal	°
β_e	: Angulo de la hélice	°
Z_1	: Numero de dientes del piñón	
Z_2	: Numero de dientes de la corona	
i	: Relación de transmisión	
b_e	: Ancho de diente	mm
X_1	: Factor de corrección del piñón	
X_2	: Factor de corrección de la corona	
k	: Factor de corrección del engranaje	
R_m	: Rugosidad media	μm
σ_{Flim}	: Resistencia a la fatiga (Raíz)	$\frac{N}{mm^2}$
σ_{Hlim}	: Resistencia a la fatiga (Flanco)	$\frac{N}{mm^2}$
α_t	: Angulo de presión transversal en el círculo primitivo	°
α_n	: Angulo de presión normal	°
m_t	: Modulo tangencial	mm
Z_{n1}	: Numero virtual de dientes del piñón	
Z_{n2}	: Numero virtual de dientes de la corona	
d_c	: Distancia entre centros	mm
a'	: Distancia entre centros corregida	mm

F_t	: Fuerza tangencial en el diente	mm
d_1	: Diámetro primitivo del piñón	mm
d_2	: Diámetro primitivo de la corona	mm
d_{a1}	: Diámetro de círculo exterior del piñón	mm
d_{a2}	: Diámetro de círculo exterior de la corona	mm
d_{b1}	: Diámetro de círculo base del piñón	mm
d_{b2}	: Diámetro de círculo base de la corona	mm
α'_t	: Angulo tangencial corregido	$^\circ$
g_a	: Segmento de engrane	mm
P_{et}	: Paso transversal	mm
ϵ_α	: Factor de engrane	
σ_{FN1}	: Tensión nominal en la raíz del diente del piñón	$\frac{N}{mm^2}$
σ_{FN2}	: Tensión nominal en la raíz del diente de la corona	$\frac{N}{mm^2}$
σ_{FP1}	: Tensión admisible en el piñón	$\frac{N}{mm^2}$
σ_{FP2}	: Tensión admisible en la corona	$\frac{N}{mm^2}$
K_A	: Factor de servicio	
Y_{Fa1}	: Factor de forma para el piñón	
Y_{Sa1}	: Factor de concentración de tensión en el piñón	
Y_ϵ	: Factor de engrane	
Y_β	: Factor de inclinación de la hélice	
σ_{Flim1}	: Esfuerzo pulsante de flexión en la raíz del diente	
S_{Flim}	: Factor de seguridad mínimo	
Y_{ST}	: Factor de corrección de la tensión para dimensiones de ruedas	
Y_{drelT1}	: Cifra relativa de apoyo, que considera la sensibilidad a la entalla del material en el piñón	
Y_{RrelT}	: Factor de acabado superficial en el redondeo de la raíz	
Y_X	: Factor de tamaño	

Y_{NT}	: Factor de duración	
Y_{Fa2}	: Factor de forma para la corona	
Y_{Sa2}	: Factor de concentración de tensión en la corona	
Y_{drelT2}	: Cifra relativa de apoyo, que considera la sensibilidad a la entalla del material en la corona	
Z_H	: Factor de zona	
Z_E	: Factor de elasticidad	
Z_ϵ	: Factor de engrane	
Z_β	: Factor de ángulo de hélice	
σ_{Hlim1}	: Esfuerzo de fatiga en el perfil del diente	$\frac{N}{mm^2}$
S_{Hmin}	: Factor de seguridad mínimo para evitar picaduras	
Z_{NT}	: Factor de duración por presión en el flanco	
Z_L	: Factor de lubricación	
Z_R	: Factor de rugosidad	
Z_V	: Factor de velocidad	
Z_W	: Factor de apareamiento de los materiales	
Z_X	: Factor de tamaño	
σ_{HN1}	: Tensión nominal en el punto de rodadura	$\frac{N}{mm^2}$
σ_{HP1}	: Tensión admisible del material	$\frac{N}{mm^2}$
σ_{cs}	: Esfuerzo de compresión en el soporte del dispositivo	$\frac{N}{mm^2}$
$F_{soporte}$: Fuerza aplicada en el soporte del dispositivo	N
$d_{soporte}$: diámetro de la sección del soporte del dispositivo	mm
σ_{lims}	: Esfuerzo admisible para condición de pandeo en el soporte	$\frac{N}{mm^2}$
a_1	: Radio de ubicación del calentador en la placa de medición	mm
k	: cantidad de calentadores	
b	: Radio de la placa de medición	mm
n	: $n=1$; para un solo calentador	

$F_{(n,r)}$: Factor para distribución de temperatura	
V	: diferencia de temperatura entre la placa caliente y fría	$^{\circ}\text{C}$
$v(r)$: Variación de la temperatura a través radial en la muestra	$^{\circ}\text{C}$
e_h	: Espesor de la placa de medición	mm
δ_h	: Conductividad térmica del material de la placa	$\frac{W}{\text{mm} * K}$
R	: Resistencia térmica de la muestra	$\frac{\text{mm}^2 * K}{W}$
d	: Radio exterior de placa de guarda	mm
c_1	: Ubicación radial del calentador en la guarda	mm
L_f	: Longitud dilatada	mm
α_{Alum}	: Coeficiente de dilatación térmica del aluminio	$1/^{\circ}\text{C}$
Δ_{centro}	: Variación de la distancia entre centros	mm
S_{Alum}	: Factor de forma	
Z_c	: Numero de conductos	
L_c	: Longitud del conducto	mm
D_c	: Diámetro del conducto	mm
q_{Alum}	: Calor por unidad de longitud transferido a través del aluminio	W/m
k_{Alum}	: Conductividad térmica del aluminio	$\frac{W}{\text{mm} * K}$
L_{Alum}	: Longitud total de los conductos	mm
Q_{Alum}	: Calor transferido al aluminio	
ΔT_{Alum}	: Diferencia de temperaturas entre las placas fría y caliente	$^{\circ}\text{C}$
\dot{m}_{H_2O}	: Flujo másico del refrigerante (agua)	$\frac{kg}{s}$
C_{pH_2O}	: Calor específico del agua	$\frac{J}{kg * K}$
ΔT_{H_2O}	: Variación deseada entre la temperatura de entrada y salida del refrigerante	$^{\circ}\text{C}$
E_b	: Error de borde	
T_b	: Temperatura en el borde de la muestra	$^{\circ}\text{C}$

INTRODUCCIÓN

La normalización de la medición de propiedades térmicas es un tema que ha cobrado mayor importancia a partir de su influencia directa en el ahorro energético que va de la mano con la tendencia del uso de tecnologías que sean sostenibles. La medición de la conductividad térmica y su estudio nació en forma casi paralela en Estados Unidos y en Alemania alrededor de los años 1910. Actualmente, varios países consideran la importancia de la medición de esta propiedad por las razones antes explicadas, por lo cual poseen dispositivos de medición diseñados para llevar a cabo los ensayos.

Para desarrollar la presente tesis se ha considerado cuatro capítulos: El primer capítulo considera los materiales a ensayar siendo los materiales usados en edificación, así como los requerimientos de la norma. En el segundo capítulo se ha dimensionado mediante cálculos las características del dispositivo en base a la propia norma y estudios previos sobre este dispositivo. El tercer capítulo se selecciona los elementos más importantes del dispositivo en base a recomendaciones de los fabricantes y que son la base para estimar el presupuesto que forma parte del cuarto capítulo. Finalmente, en base a todo lo expuesto anteriormente se realizan los planos de fabricación y ensamble que se encuentran dentro de los anexos.

Por lo mencionado anteriormente, se plantea en la tesis los siguientes objetivos:

Objetivo General:

- Obtener el diseño de un dispositivo que mida la conductividad térmica de materiales empleados en edificación según la norma ASTM C1043

Objetivos específicos:

- Realizar el diseño para el posicionamiento de la muestra y la estructura de soporte
- Seleccionar los accesorios e instrumentos del dispositivo
- Determinar el presupuesto del proyecto
- Realizar los planos de ensamble y despiece

CAPÍTULO 1

NORMATIVA Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

1.1 Generalidades

El objetivo del presente capítulo es explicar el funcionamiento del método de la placa caliente con guarda y particularmente el método de la placa caliente con calentador circular.

Para el presente trabajo, se ha elegido la norma ASTM C1043 como base para el diseño. Para definir el diseño se ha usado la metodología de diseño DIN VDI 2221 y 2225.

De manera introductoria se explicará la importancia de la conductividad térmica y los materiales elegidos.

1.1.1 La conductividad térmica y su importancia

La conductividad térmica es una propiedad que se relaciona con los conceptos de eficiencia energética y el confort térmico de manera cercana afirma la empresa española BASF Construction Chemicals España S.L. que provee soluciones aislantes para edificaciones; también diferentes empresas dedicadas al tema y revistas de ingeniería como, por ejemplo, la que publica mensualmente la American Society of Mechanical Engineering detallan esta relación de una manera similar.

En el reportaje de BASF, especialistas señalan que los aislantes son el material que afectan directamente en que la energía invertida para lograr una climatización, responsable del confort térmico, se pierda. Así también se evita que elementos patológicos como el moho que se forman a partir de condensaciones superficiales que se dan a través de un lugar

refrigerado que pierde su condición rápidamente si no está bien aislado. Otro dato interesante que se afirma es que, en promedio en España un edificio consume 40% del total de energía en calefacción y aire acondicionado. Además lo interesante es que ellos consideran que las propiedades de conductividad térmica, resistencia a la humedad, resistencia a la compresión o incluso la reacción al fuego son las más importantes cuando se habla de materiales aislantes usados en la construcción [1].

Así también, para tener una la perspectiva de lo que considera importante una norma nacional que contemple el uso de materiales de construcción y de sus propiedades, se ha tomado como referencia la norma nacional mexicana que contiene un capítulo relacionado al uso de los aislantes térmicos en edificaciones y siendo las propiedades de conductividad térmica, densidad aparente, permeabilidad al vapor de agua y la absorción de humedad las evaluadas [2].

Por otra parte, desde el punto de vista de energía se consideró como referencia un journal de la editorial Elsevier. Dentro de este documento podemos inferir que las propiedades más relevantes son la conductividad térmica, la densidad específica y el calor específico. También se precisa que la densidad específica influye en la masa térmica del material [3].

Luego de revisar estas fuentes, se entiende que existen una diversidad propiedades relacionadas a los elementos aislantes, más aún, si consideramos los elementos de construcción las variables a tener en cuenta van en aumento, pues se tiene que tener en cuenta propiedades como la resistencia a la compresión, la porosidad entre otras; y a pesar que estas difieren de las propiedades que consideran según su punto de vista, siempre se menciona a la conductividad térmica.

1.1.2 El ahorro energético en el Perú y caso práctico

La conductividad térmica tiene influencia directa en el ahorro energético como se menciona en el párrafo anterior. En nuestro país tenemos algunos datos interesantes para justificar nuestra propuesta. En la figura 1 vemos el consumo energético en nuestro país a través de los años y se ve la tendencia a un mayor consumo, esto se justifica por el uso de la tecnología, aumento de la población, entre otros. Esto implica que la demanda energética ira en aumento en los próximos años y es allí donde entra la importancia del uso de

materiales cuya conductividad térmica sea baja para reducir la transferencia de calor a través de estos y así reducir el consumo de energía.

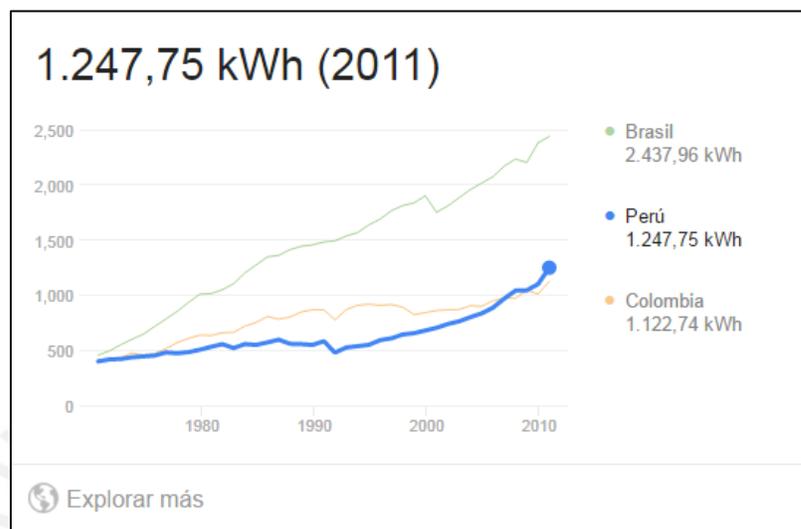


Figura 1. 1 Consumo de electricidad per cápita en Perú (2011) (Fuente: Banco Mundial)

Otro aspecto interesante de la gráfica es que si bien es cierto la tendencia es que se eleve el consumo energético, en nuestro caso, el consumo se ha elevado más en comparación a países como Colombia, a quien incluso hemos superado. En otros países, como Brasil, la demanda energética es tal que compran energía a otros países como el nuestro. Por tanto, es necesario tomar con atención este crecimiento y tomar medidas.

Caso Práctico:

En el año 2008, como consecuencia del friaje el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento a través del Decreto Supremo N° 019-2008-Vivienda, declaró de interés nacional la implementación del “Sistema Pasivo de Recolección de Energía Solar de Forma Indirecta” denominado “Muro Trombe”. El desarrollo de este proyecto se encargó al Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO), entidad que ha instalado 17 754 muros trombe en 615 localidades de 12 regiones, tarea para la que el Ministerio de Vivienda le transfirió 15,4 millones de nuevos soles. La Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) también participa en el desarrollo de nuevas tecnologías con materiales locales para lograr viviendas confortables en las zonas altas. Durante el último año ha construido una casa bioclimática de 50 m² en Vilcashuamán - Ayacucho, utilizando adobe,

pisos de grava para aislar el suelo, claraboyas en el techo para permitir el ingreso de rayos solares, un invernadero para el cultivo de hortalizas y el calentamiento interno. Con este tipo de viviendas se consiguen temperaturas al interior de hasta 20 °C. En esta misma línea, un equipo de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) donde algunos de los integrantes pertenecen a nuestra especialidad de ingeniería mecánica han implementado el proyecto K'õnichuyawasi (La Casa Caliente Limpia) en Canas - Cusco, que cuenta con un conjunto de tecnologías apropiadas: pared caliente (trombe inclinado), cocina mejorada, terma solar y sistema de aislamiento de techos.

Estos dos proyectos, que son claros ejemplos de la búsqueda del ahorro energético, se orientaron al uso de materiales de construcción con propiedades térmicas adecuadas. En este caso el muro trombe que resulta de la combinación de un material empleado en construcción como el adobe, hormigón, piedra u otros y láminas de vidrio orientadas al sol para generar un sistema de calefacción natural. La propiedad térmica de este material compuesto puede ser cuantificada y ensayada con un dispositivo para medir la conductividad térmica, tema de la presente tesis. La importancia radica en que, si podemos cuantificar el valor de la conductividad térmica, entonces podremos tener una base científica para elegir los materiales y la configuración más adecuada para lograr un ahorro en términos energéticos y económicos.



Figura 1. 2 Proyecto desarrollado por el GRUPO PUCP (Fuente: http://gruporural.pucp.edu.pe/nuestros_proyectos/konichuyawasi-casa-caliente-limpia/)

1.1.3 Características de los materiales de construcción en el Perú

Los materiales usados en una construcción son diversos y sus características dependen de la función del elemento que conforman. Uno de los materiales más usados en el Perú es el adobe que tiene una densidad aproximada de 1280 Kg/m³ y un valor aproximado de conductividad térmica de 0,58 W/m.K según el instituto CRAterre de Francia [4]. Este valor es un poco inferior que el del ladrillo (0,65 – 0,79 W/m.K) y también el del hormigón armado (1,74 W/m.K) por citar dos materiales usuales en las construcciones [5].

A continuación, se describen los materiales usados comúnmente en el Perú:

El Adobe: Ampliamente conocido por su baja conductividad térmica, vuelve a las construcciones de adobe muy acogedoras. Sus cualidades que lo limitan como material de construcción también son conocidas; el adobe es higrófilo pues tiende a absorber la humedad cuando el aire está saturado alterando sus propiedades y disminuyendo abruptamente su resistencia a los esfuerzos, aun los de su propio peso. Sus resistencias a la compresión se consideran bajas (de 3 a 5 Kg/cm²) cuando está seco. Además su resistencia puede considerarse nula a los esfuerzos de tracción. Por esas mismas características su manipulación se vuelve más difícil, los adobes se quiebran al no haber sido curados de manera que puedan resistir su manejo para colocación en su lugar [6].



Figura 1. 3 Las construcciones de adobe en el Perú se encuentran presentes en la sierra en su mayoría (Fuente: <http://www.ecocosas.com>)

El ladrillo: Es un elemento constructivo y tradicional para la construcción de muros. Se trata de un paralelepípedo de arcilla cocida, se puede hacer inclusiones en la mezcla de otros materiales, de medida variable, y que gracias a esto puede tener distintas características [7].

TECHOS



Figura 1. 4 Ladrillos usados en techos (Fuente: <http://www.ladrillosrex.com/>)

PAREDES

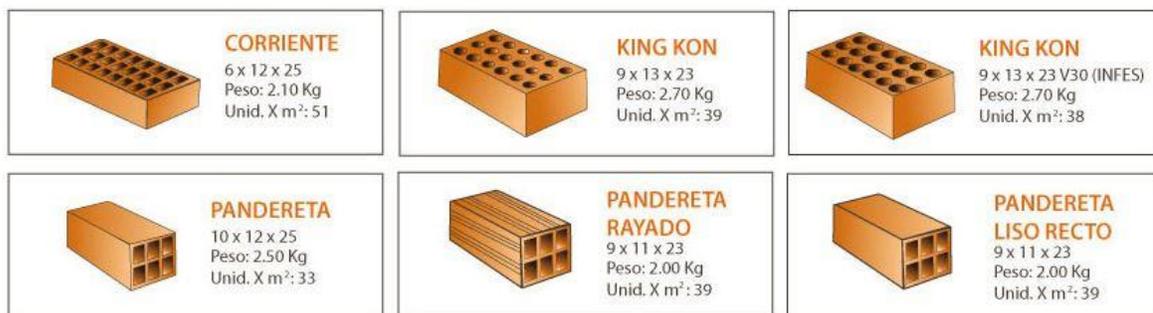


Figura 1. 5 Ladrillos usados en paredes (Fuente: <http://www.ladrillosrex.com/>)

Hormigón: El hormigón es una mezcla de áridos, cemento, aditivos y agua. El hormigón es el material de construcción más común y utilizado por su fácil fabricación, relativamente económica y de gran durabilidad.



Figura 1. 6 Ladrillos de hormigón (Fuente: <http://www.construnario.com>)

Mortero: El mortero es un material que resulta de combinar cemento con la arena, la piedra y el agua, crea una mezcla capaz de endurecerse hasta adquirir la consistencia de una piedra. Entre los tipos existentes en el Perú se encuentran el cemento tipo I, tipo V y el puzolánico IP.



Figura 1. 7 Ladrillos usados en paredes (Fuente: <http://www.sodimac.com.pe>)

A continuación, mostramos un apartado de la norma argentina IRAM 11601 que contiene información sobre los materiales de construcción que también son empleados dentro de nuestro país. El resto de los materiales puede verse en el Anexo 1.

Tabla 1.1 Conductividad térmica de materiales de construcción A

Material	Densidad aparente [kg/m ³]	Conductividad térmica [W/mk]
Roca y terrenos		
Toba (Purmicita)	1400	0,38
Caliza porosa	1700	0,93
Caliza compacta	2000	1,16
Piedra pómez	600	0,19 a 0,31
	800	0,27 a 0,41
	1000	3,35 a 0,46
	1400	0,58 a 0,66
Placas o bloques		
Mármol	2500 a 2800	2,1 a 3,5
Ónix	-	2,7
Granito	2600 a 2900	2,9 a 4,1
Cuarcita	2800	6,0
Basalto	2800 a 3000	1,3 a 3,7
Arcilla	1200	0,37
Suelo natural	1600 a 1900	0,28 a 2,8
Materiales para rellenos de suelos desecados al aire, en forjados, etc.		
Arena	Arena Humedad 2%	0,58
	Arena de rio Hum. 10%	0,93
	Arena de rio Hum. 20%	1,33
	Arena de rio saturada	1,88
	Arena de mar Hum. 10%	1,24
	Arena de mar Hum. 20%	1,75
	Arena de mar saturada	2,44
Arenisca	2200	1,40
	2400	2,10

Tabla 1.2 Conductividad térmica de materiales de construcción B

Material		Densidad aparente [kg/m ³]	Conductividad térmica [W/mk]	
Escorias porosas		800	0,24	
		1000	0,29	
		1200	0,33	
		1400	0,41	
Gravas		1500 a 1800	0,93	
Morteros, Hormigones y yeso				
Morteros de revoques y juntas (exterior)		1800 a 2000	1,16	
Morteros de revoques y juntas (interior)		1900	0,93	
Mortero de cemento y arena	1:3	Hum. 0%	1900	0,89
		Hum. 6%	2000	1,13
		Hum. 10%	2100	1,30
	1:4	Hum. 0%	1950	0,92
		Hum. 5%	2000	1,10
Mortero con perlita		600	0,19	
Mortero de yeso y arena		Hum. 12%	1500	0,65
Mortero de cal y yeso		1400	0,70	
Enlucido de yeso		800	0,40	
		1000	0,49	
		1200	0,64	
Hormigón normal con agregados pétreos		1800	0,97	
		1900	1,09	
		2000	1,16	
		2200	1,40	
		2400	1,63	
		2500	1,74	

El principio tiene dos posibles configuraciones: con doble lado de medición y con un solo lado de medición. El principio, en caso del doble lado de medición, se basa en colocar la muestra entre una placa calentada eléctricamente y dos placas frías opuestas mantenida a baja temperatura. En cuanto al calor liberado dado por en el efecto Joule, éste permite la transferencia de calor desde la placa caliente hacia la o las placas frías a través de la muestra. Sin embargo, también se disipa calor hacia las caras laterales. Para evitar la transferencia de calor en esas direcciones es necesaria la zona de guarda. Entonces, logrando que la zona de guarda esté a la misma temperatura se evita la transferencia en esas direcciones. Por ello, la placa caliente se divide en dos partes: una zona medición de área conocida calentada eléctricamente y la zona denominada anillo de guarda también calentada eléctricamente, pero por un circuito independiente a la primera. Así también, existe un pequeño vacío entre estas dos superficies y una termopila generalmente es utilizada para controlar la diferencia de temperaturas entre ambas. En el caso de la placa caliente con un solo lado de medición, el principio es el mismo, con la diferencia que se usa solo una placa fría frente a una de las caras de la placa caliente [9]. Mientras al lado contrario se coloca una placa de guarda con la finalidad de evitar el flujo de calor en esa dirección. Esta placa también tiene su propio circuito de calentamiento y al igual que en el caso anterior se usa una termopila para controlar la diferencia de temperatura [8].

1.2.2 El aparato de placa caliente con guarda con calentador circular ASTM C1043

La norma ASTM C1043 se desprende de la norma ASTM C177, es decir, el funcionamiento es como el descrito en la norma en la ASTM C177, sin embargo, la ASTM C1043 se considera el uso de calentadores circulares y expresiones matemáticas con lo cual se permite reducir el error cerca al 5%. Esto es posible pues al tener una geometría circular tanto en el área de medición en como los calentadores, entonces la distribución de la temperatura es uniforme. El rango de funcionamiento que sugiere la norma es hasta 65°. Las características de los materiales a ensayar son los usados en la norma ASTM C177. La norma brinda información y procedimientos de cálculo para:

- El error debido a la transferencia de calor en el borde
- Ubicación e instalación de los calentadores lineales
- Diseño del vacío entre la placa de medición y guarda

- Ubicación de los sensores de temperatura

Es por ello que en la actualidad se usa este principio por ser el de mayor precisión, a menos que se requiera evaluar la conductividad en un rango distinto al mencionado anteriormente. Como se observa en las figuras 1.9 y 1.10, el principio se mantiene, sin embargo, cambia el aspecto constructivo, por ejemplo, podemos observar los calentadores circulares cuya ubicación se realiza mediante expresiones matemáticas brindadas en la norma ASTM C1043.

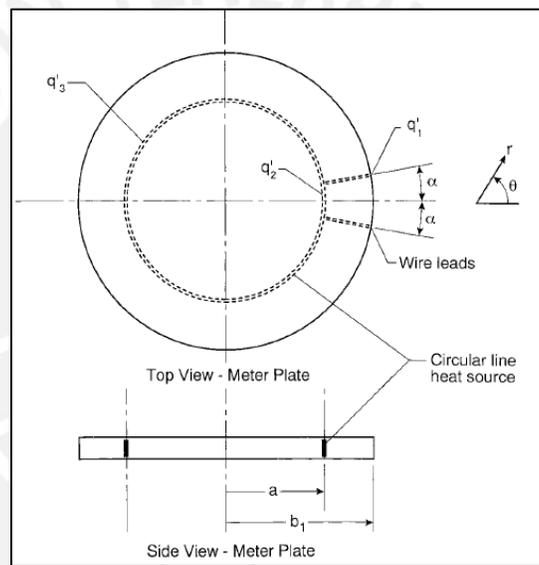


Figura 1. 9 Ubicación de los calentadores en el área de medición según expresiones detallados en la norma [10]

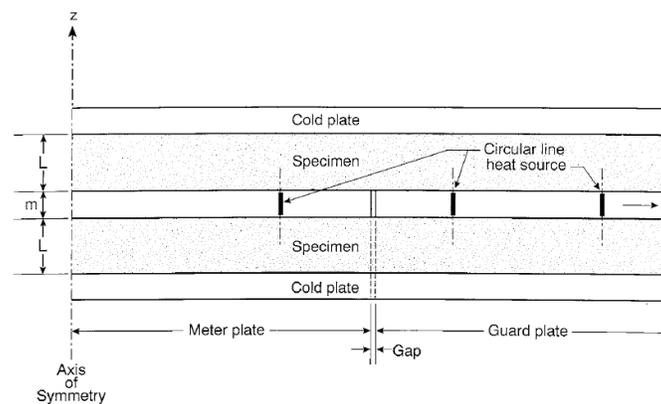


Figura 1. 10 Esquemático del aparato según C1043 [10]

El espacio que se encuentra entre la placa de medición y la placa de guarda, a diferencia de la norma C177, considera geometrías constructivas que permiten una mejor distribución.

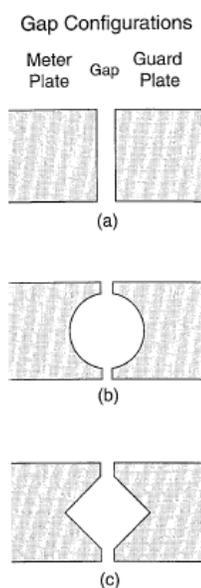


Figura 1. 11 Configuraciones del espacio entre la placa de medición y la de guarda [10]

1.2.3 Características de las muestras

La norma establece ciertas características para las muestras al momento de realizar el ensayo como homogeneidad, espesor, entre otros. Las muestras son cuadradas y la única condición es que deben cubrir el área de medición y el área de guarda hasta donde se ubica el calentador de ésta.

1.2.3.1 Tratamiento de la muestra

Según la norma ASTM C 1043 se menciona que, en los materiales de construcción, en particular los de obra, existen en muchas variantes por ejemplo ladrillos, bloques, aglutinados, etc. En todos los casos deberá asegurarse que la muestra del ensayo es lo más plana posible. El cemento fraguado y los materiales de albañilería para los que las

muestras que se preparen a base de estos se deberán hacer 28 días antes de los ensayos para su consolidación, y se deberá registrar la fecha de fabricación. Las muestras contienen una cantidad grande de agua como consecuencia de la fabricación y preparación. Se deberá tener gran cuidado al seleccionar las condiciones de ensayo en relación al contenido de humedad con el fin de eliminar la transferencia de masa durante el ensayo. La superficie de las muestras de ensayo deberán ser lo más lisas posibles mediante tratamientos adecuados (lijado, corte con máquinas tipo radial (disco), lijadoras mecánicas), de tal forma que el contacto entre las muestras y el equipo o puntos interpuestos, sea lo más perfecto posible. Para materiales rígidos, las caras de las muestras deben ser tan planas como las superficies de los equipos y deberán ser paralelas sobre la totalidad del área de la superficie con un 2% del espesor de la muestra.

La planeidad de las superficies, puede ser comprobada, por ejemplo, con un nivelador de buena calidad (tolerancia de hasta 0,01 mm) y aplicado sobre la superficie y observando la incidencia de grano, con un foco que ilumine la superficie, por detrás del nivelador. Desviaciones tan pequeñas como 25 μm son visibles con facilidad. Desviaciones grandes, pueden ser medidas usando calibradores y comprobadores de nivel, tal como se indica. Los comprobadores de nivel deberían estar soportados sobre un bloque calibrado y de espesor conocido, (1 mm sería correcto) en cada extremo de la superficie que debe de ser inspeccionada. Las desviaciones negativas y positivas pueden ser medidas usando calibres a lo largo de una línea recta. Se deberían inspeccionar ocho líneas, tal como sigue: los cuatro lados de la superficie, las dos diagonales, y la cruz central (dos líneas paralelas a los extremos de la superficie). Cuando este procedimiento, aplicable a ambos aparatos y a las superficies de la muestra, se aplica a la muestra que se inspecciona, se debería de repetir para cada cara de la misma.

1.2.3.2 Homogeneidad de la muestra

El principio del ensayo asume las muestras homogéneas. Sin embargo, algunos productos de media y baja resistencia térmica, no cumplen con la definición de medio homogéneo poroso. Estos productos pueden ser ensayados siempre que la dimensión nominal del máximo de agregados, poros, granos, o cualquier otro componente no homogéneo tenga dimensiones menores que un décimo del espesor de la muestra. Si el espesor de la muestra

no cumple este requisito, pero es mayor que 5 veces el máximo nominal del agregado o dimensión del poro, la medición puede realizarse si lo permite la norma de producto de aplicación, siempre que, muestren que este límite es compatible con la precisión del ensayo requerida. Los ensayos no se deberán realizar para espesores menores. Para muestras que posean una composición heterogénea y laminada, la indicación de la conductividad térmica media medible, de cada estrato, debe de ser menor que dos veces la de cualquier otro estrato. Algunas muestras, mientras cumplen los criterios de la homogeneidad, son anisótropas, mientras que el valor medido, de la conductividad térmica en una dirección paralela a las superficies, es diferente a las obtenidas en una dirección perpendicular a ellas. Para esas muestras esto, puede suponer un desequilibrio mayor y un límite en los errores. Si la relación entre estos dos valores medibles, es mayor que dos, se deberá de consultar la Norma ISO 8302:1991 [10]

1.2.3.3 Espesor máximo de la muestra

Las condiciones de contorno en los bordes de las muestras, debido a los efectos del límite del aislamiento de los calentadores auxiliares aislados y la temperatura ambiental afectará al error del límite del calor perdido, y de este modo, se limitará el espesor de la muestra para cualquier configuración [11].

1.2.3.4 Espesor mínimo de la muestra

El espesor mínimo de la muestra, está limitado por las resistencias debido al contacto, así como, por la precisión de la instrumentación para la medición del espesor. En relación al espacio (hueco) que existe entre el área de medición y el área de guarda, el espesor mínimo deberá ser al menos 10 veces el ancho del espacio [11].

Tabla 1.5 Espesor mínimo y máximo de la muestra [11]

Medidas en su conjunto	Sección medidora	Anchura de la guarda	Espesor máximo según la conductividad térmica de la muestra			Tolerancia de planicie (0,025%)	Espesor mín. (Tolerancia de Planicie)	Hueco Máximo	Espesor mín. (Límite del hueco)
			<0,4	0.8	>1,6				
200	100	50	30	35	40	0,05	10,0	1,25	12,5
300	200	50	35	40	45	0,08	15,0	2,50	25,0
300	150	75	45	55	65	0,08	15,0	1,88	18,8
400	200	100	60	70	85	0,10	20,0	2,50	25,0
400	100	150	80	95	110	0,10	20,0	1,25	12,5
500	300	100	65	80	90	0,13	25,0	3,75	37,5
500	250	125	75	90	100	0,13	25,0	3,13	31,3
500	200	150	85	100	120	0,13	25,0	2,50	25,0
600	300	150	90	110	130	0,15	30,0	3,75	37,5
800	500	150	100	120	150	0,20	40,0	6,25	62,5
800	400	200	120	140	170	0,20	40,0	5,00	50,0
1000	500	250	150	180	210	0,25	50,0	6,25	62,5

1.2.3.5 Límites máximos para la resistencia térmica

El límite superior de la resistencia térmica que puede ser medido, está limitado por la estabilidad de la potencia suministrada a la unidad calefactora, la capacidad de la instrumentación para medir el nivel de potencia y la extensión de las pérdidas o ganancias de calor, debidos a los errores de la temperatura no balanceada entre la central de medición y las secciones aisladas de las muestras y de la unidad calefactora [11].

1.2.3.6 Resistencia de contacto y planicie

Cuando se ensayen muestras en particular de alta conductancia térmica y rígida con pequeñas no uniformidades en la superficie del equipo y la muestra, permitirán que las resistencias de contacto no se encuentren distribuidas uniformemente entre las muestras y

las placas de las unidades calefactoras o enfriadoras. Estas razones causan que la distribución del flujo de calor no sea uniforme afectando en la precisión de la medición de la temperatura de la superficie de la muestra e incluso originar una incertidumbre en la medición del espesor de la muestra [11].

1.2.3.7 Diferencia de temperatura a través de la muestra

Las muestras no rígidas con superficies uniformes y planas, que conforman bien las superficies planas o a las placas, y la resistencia térmica que no es significativamente más baja que $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, el diferencial de temperatura a través de ellos, es normalmente tomado para ser indicado mediante sensores de temperatura, usualmente termopares, permanentemente instalados en las superficies de las unidades calefactoras y enfriadoras. En cambio, las muestras rígidas pueden ser instaladas en el equipo, con láminas de material homogéneo y apropiado, interpuesto entre la muestra y cada placa. La diferencia de temperatura a través de la muestra rígida viene determinada por sensores de temperatura, que se encuentran separados, normalmente termopares montados, en el mismo plano o en el interior de la superficie de la muestra [11].

1.2.3.8 Paralelismo

El paralelismo no es tan crítico como la planicie para los procedimientos descritos en la norma. La máxima desviación para ver el paralelismo de las superficies de la muestra, es definida por los requisitos del espesor de la muestra y no debe de ser diferente del valor medio en un 2% [11].

1.2.3.9 Límites de la diferencia de temperatura

Se recomienda que las diferencias de temperatura entre la placa caliente y fría sean en un rango desde 10 K hasta 50 K para minimizar los errores en las mediciones de las diferencias de temperatura [11].

1.2.3.10 Temperatura máxima de operación

La temperatura máxima de operación de las unidades calefactoras y enfriadoras, puede ser limitada por la oxidación, la fatiga térmica u otros factores que degradan la planitud y la

uniformidad de la superficie de la placa/lámina por los cambios de resistividad eléctrica o por los aislamientos sobre componentes eléctricos, que pueden afectar a todas las mediciones eléctricas [11].

1.2.3.11 Deformación

Si una muestra posee gran coeficiente de expansión térmica deberá tener precaución al momento de que estén sujetas a un gradiente de temperatura. La deformación puede dañar el equipo o puede causar una resistencia de contacto adicional que podrá conducir a errores serios en la medición [11].

1.2.3.12 Tiempo establecido e intervalo de medida

De acuerdo a la norma EN 12664, el principio del método necesita llegar a las condiciones del estado estable (equilibrio térmico) para conseguir un valor correcto de las propiedades. Si se quiere establecer de manera más precisa el tiempo necesario se puede utilizar la siguiente relación:

$$\Delta T = (\rho_p * c_p * d_p + \rho_s * c_s * d) * R$$

Donde:

ρ_p : La densidad del material de la placa caliente

c_p : El calor específico de la placa caliente

d_p : El espesor de la placa caliente

ρ_s : La densidad del material de la muestra

c_s : El calor específico de la muestra

d : El espesor de la muestra

R : La resistencia térmica de la muestra

Si se usan controladores automáticos, en particular para alimentar los calentadores eléctricos de la unidad calefactora, entonces Δt se deberá de reducir de acuerdo con la filosofía del control automático para tener en cuenta la presencia de los controladores.

El tiempo establecido, está relacionado con Δt , normalmente cinco veces para alcanzar el estado estable.

El intervalo de medición es recomendado que no supere el 0,25% de Δt , de tal manera que los valores obtenidos representen los valores medios.



Capítulo 2

DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

2.1 Metodología y concepto de solución

El aparato está conformado por un sistema calentador, un sistema enfriador, un sistema mecánico y la parte correspondiente a la instrumentación y control. Para realizar el presente capítulo se hará uso de la metodología de diseño basadas en las normas DIN VDI 2221 y 2225 impartida en los cursos de pregrado de nuestra casa de estudios con la finalidad de seleccionar la mejor opción que cumpla con los requerimientos técnico-económicos.

2.1.1 Lista de exigencias

Se definen los requerimientos necesarios para el diseño del aparato, se tomara como referencia la norma ASTM C1043 y los documentos que tienen parte en la medición de la conductividad térmica de materiales de edificación. Se considerará las recomendaciones de la norma europea EN 12664, la cual tiene su base en la norma ISO 8302, así también, la información brindada por la ASTM (American Society for Testing Materials) en su trabajo sobre la medición de propiedades térmicas mediante la placa caliente con guarda detallado en la Norma C177-13 y los criterios de diseño para aparatos de placa caliente guardada establecidos por De Ponte y Di Filippo. Los requerimientos establecidos para el diseño del aparato se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 2.1 Lista de exigencias A

LISTA DE EXIGENCIAS		Pág.	1 de 2
PROYECTO Diseño de un aparato para medir conductividad térmica		PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERU	
		Fecha:	26/08/15
		Facultad de Ciencias e Ingenierías Ingeniería Mecánica	
		Autor:	Arturo Vizcarra
Característica	Deseo o exigencia	Descripción	
FUNCION PRINCIPAL	E	El aparato establecerá un flujo uniforme y transversal al área de medición.	
SUPERFICIE DE LAS PLACAS	E	<ul style="list-style-type: none"> -Deben ser lo suficientemente rígidas para mantener un valor de planicidad y paralelismo establecido. -Deben tener mayor conductividad térmica que las muestras a medir para asegurar superficies isotérmicas. -Debe tener una emisividad 0,8-0,9 para evitar el efecto de radiación 	
ELEMENTO CALEFACTOR	E	Debe estar simétricamente centrado en la dirección axial para mantener temperaturas iguales en las caras opuestas de la placa caliente	
UNIONES DE PLACA CON GUARDA	E	Los elementos de unión de la placa caliente con la guarda deben tener una resistencia térmica alta, deben de ser de sección transversal pequeña y lo más largo que se pueda para evitar transferencia de calor a través de ellos.	
ENERGIA	E	Mantener las condiciones de temperatura constante en las superficies de las placas caliente y fría.	
GEOMETRIA	E	El aparato será compacto y permitirá su manipulación para una persona	
CINEMÁTICA	E	Se tendrá un sistema que permita acoplar las muestras a medir de manera correcta y que no afecte el ensayo	
FUERZAS	E	Estará diseñado para trabajar bajo los efectos de deformación térmica y esfuerzos mecánicos involucrados.	
CONTROL	D	Aplicar el uso de control automático reduce significativamente el tiempo para llegar a régimen permanente.	
MUESTRA	E	<ul style="list-style-type: none"> - La muestra se rige por las normas de los productos a medir, se cubrirá los requerimientos para ensayar materiales de construcción. -Se debe asegurar un buen contacto térmico y uniforme entre las superficies del espécimen y las placas 	
ERROR DEL ENSAYO	D	El diseño tendrá en cuenta un error de medición aproximadamente del 5% en base a las sugerencias de normas y lecciones aprendidas de trabajos anteriores.	

Tabla 2.2 Lista de exigencias B

LISTA DE EXIGENCIAS		Pág.	2 de 2
PROYECTO Diseño de un aparato para medir conductividad térmica		PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERU	
		Fecha:	26/08/15
		Facultad de Ciencias e Ingenierías Ingeniería Mecánica	
		Autor:	Arturo Vizcarra
Característica	Deseo o exigencia	Descripción	
TIEMPO DE ENSAYO	E	Se considerará todos los aspectos que influyan en la reducción del tiempo que va en el orden de las horas para ensayos de materiales de construcción.	
MANUFACTURA	D	-Se tomará en cuenta la fabricación más simple siempre y cuando no afecte a la precisión del ensayo.	
MANTENIMIENTO	E	Se tendrá el mercado nacional como prioridad para el recambio de piezas. También, se considerará que el diseño permita realizar un adecuado mantenimiento, siendo los calentadores la zona más crítica.	
MONTAJE	E	El aparato debe tener la capacidad de ser desmontado y montado sin dificultad	
TRANSPORTE	D	Estos aparatos necesitan de un ambiente controlado, se considera útil el fácil transporte en cuanto se requiera, pero no es una necesidad para llevar a cabo su función.	
COSTOS	D	Se buscará la mejor opción económica en tanto no afecte a la precisión del ensayo	
SEGURIDAD	E	-El aparato será seguro para el operario y cumplirá las normas de seguridad industrial. -Las conexiones estarán debidamente aisladas, ya que el sistema está en contacto con el ser humano y además puede alterar la medición en la muestra.	

2.1.2 Estructura de funciones

La conceptualización del diseño se inicia con la idealización del aparato como una “caja negra” donde analizaremos las variables de entrada y salida.



Figura 2. 1 “Black Box” (Fuente: Elaboración propia)

Una vez definida la necesidad a resolver mediante la lista de exigencias y la abstracción de la “caja negra”, se procede a realizar la estructura de funciones del aparato donde detallamos los procesos involucrados dentro del aparato.

1. Lo primero es preparar las muestras de acuerdo a la sección de medición y que sean idénticas en términos de homogeneidad y densidad. El espesor máximo para mantener el error menor al 5%, según ASTM C177, es equivalente a la tercera parte del lado o diámetro del área de medición. El material debe estar sobre todo el área de medición y guarda. Aunque, es posible colocar otro material similar solo para la región de guarda.
2. Para el funcionamiento del aparato es necesario que sus elementos: placa caliente, placas frías, muestras estén en contacto. Entonces es necesario que el aparato pueda desacoplarse, para permitir la colocación de las muestras y seguidamente acoplarse nuevamente. Para ello se considerará algunas opciones más adelante.
3. Luego, se entra al proceso de establecer un estado en régimen térmico estable. Como ya se ha mencionado, este va en el orden de las horas, por ejemplo de 6 horas. Para ello, se energiza el sistema de calentamiento de la placa caliente y guarda, así como, el de enfriamiento de las placas frías. Ambos sistemas deben ser monitoreado hasta que se establezca el régimen estable.
4. Una vez obtenido el régimen estable, se procederá a tomar datos correspondientes a los termopares instalados en el aparato en intervalos tiempo. Se sugiere cada 30

minutos, aunque en el capítulo 1 se dio la expresión para calcular el tiempo requerido para la estabilización térmica como la duración de los intervalos.

5. Con la información de temperaturas, el flujo de calor que es el equivalente a la potencia consumida de la fuente, el valor del espesor promedio y el área de medición que son las variables que maneja la ecuación de Fourier mostrada en el capítulo 1 se determina la conductividad para cada intervalo medido, para luego obtener una conductividad térmica promedio.

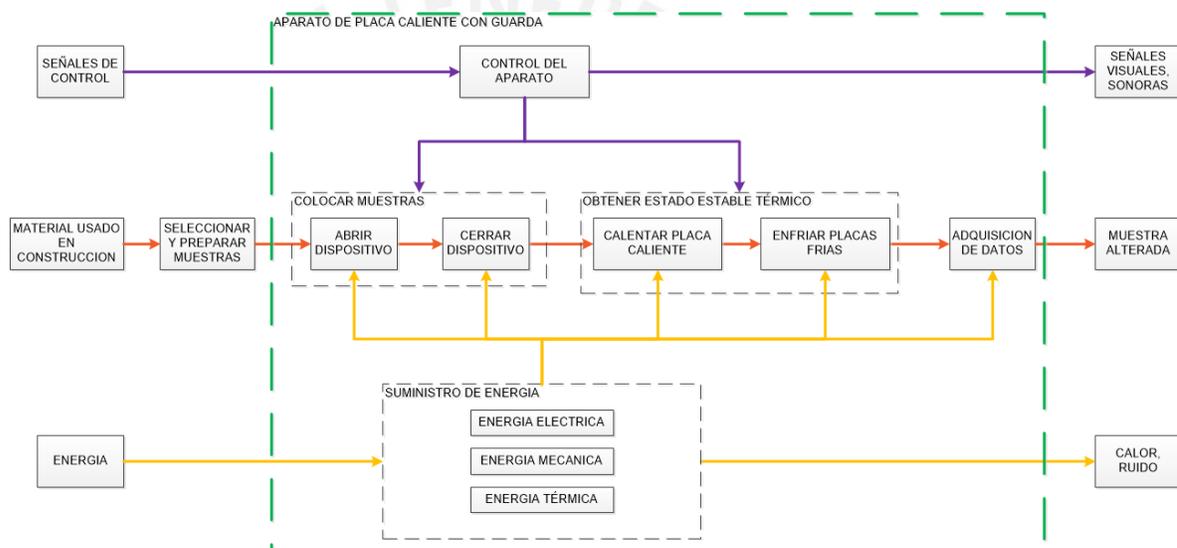
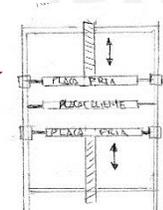
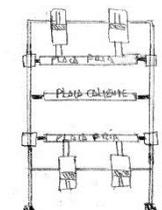
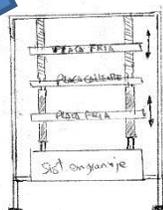
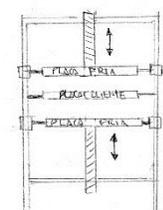
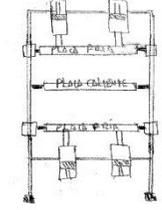
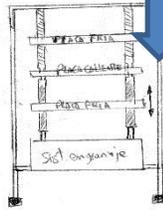
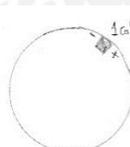
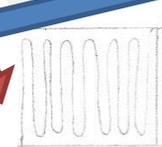
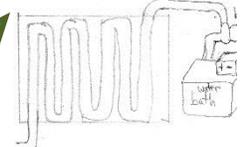
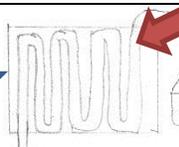


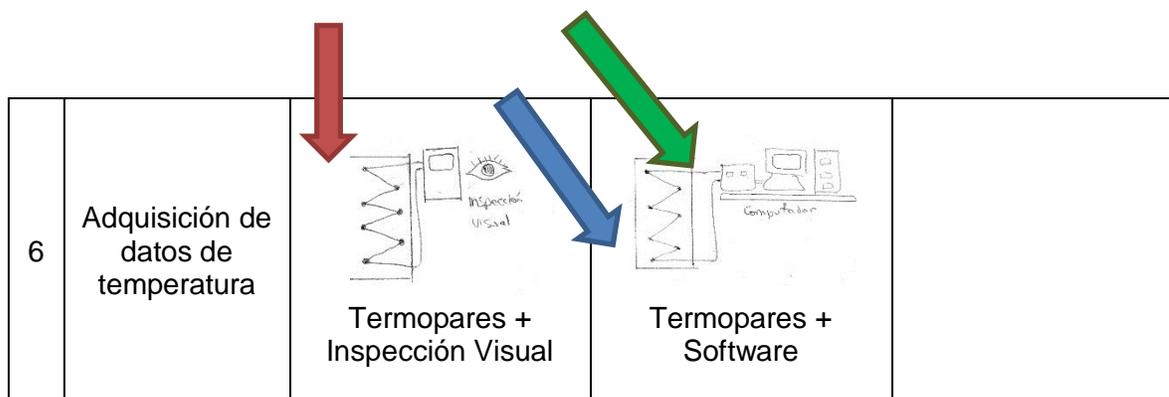
Figura 2. 2 Estructura de funciones (Fuente: Elaboración propia)

2.1.3 Conceptos de solución

Para obtener los conceptos de solución válidos, es necesario plantear posibles soluciones para cada función establecida en la estructura de funciones que se pueden apreciar claramente en una matriz morfológica.

Tabla 2.3 Matriz morfológica (Fuente: propia)

Funciones		Portadores de funciones		
		Solución 1	Solución 2	Solución 3
1	Selección y preparación de muestras	 Manual		
2	Abrir Dispositivo	 Tornillo concéntricos	 Sistema Neumático/hidráulico	 Soportes con movimiento
3	Cerrar Dispositivo	 Tornillo concéntrico	 Sistema Neumático/hidráulico	 Soportes de movimiento
4	Calentar la placa caliente	 Un calentador circular	 Calentador distribuido	 Tubos con agua + baño de temperatura controlada
5	Enfriar las placas frías	 Tubos con agua + baño de temperatura controlada		



A continuación, describiremos las tres posibles configuraciones:

Solución 1: El primer diseño considera la economía y simplicidad del diseño como base, sacrificando practicidad del ensayo y tecnología. La preparación y selección de la muestra se da forma manual, pues hay que preparar y verificar la muestra que cumplan los requerimientos de la norma del producto. El sistema mecánico para permitir el ingreso y el cierre del espacio para la muestra considera dos tornillos concéntricos ubicados uno de ellos en la parte superior y el otro en la inferior de forma concéntrica a las placas frías. Los tornillos se trasladan en conjunto con las placas frías y requieren ocupan un mayor espacio al separar las placas. Luego, el proceso de generar el flujo de calor direccional se realiza mediante el uso de un calentador distribuido en forma de zigzag en una placa cuadrada, así se provee un fácil método de calentamiento, sin embargo, es posible obtener regiones con flujos de calor no uniformes en la placa. Las placas frías mantendrán esa condición mediante la colocación de tubos circulando agua mediante un suministro de agua de la red o si no se dispone de esa facilidad, pasar a un baño termostático para recircular nuevamente. La adquisición de datos y el control del sistema térmico se dan por los sensores de temperatura (termopares) observados por el operario.

Solución 2: El segundo diseño considera un equilibrio entre la economía y simplicidad del diseño, así como, practicidad del ensayo y tecnología. La preparación y selección de la muestra se da forma manual, pues hay que preparar y verificar la muestra que cumplan los requerimientos de la norma del producto. El sistema mecánico para permitir el ingreso y el cierre del espacio para la muestra considera cuatro barras roscadas, que cumplen la función de soporte y a la vez permite el movimiento de las placas frías. Este sistema de movimiento está compuesto por un sistema de engranajes. Luego, el proceso de generar el flujo de

calor direccional se realiza mediante el uso de un solo calentador circular distribuido en una placa de tipo circular y algunas consideraciones en su fabricación, que implica un mayor costo de manufactura, pero cuya ventaja es la facilidad de análisis matemático de la distribución de temperatura para el análisis de errores en el ensayo. Las placas frías mantendrán esa condición mediante la colocación de tubos circulando agua mediante un suministro de agua de la red o si no se dispone de esa facilidad, pasar a un baño termostático para recircular nuevamente. La adquisición de datos y el control del sistema térmico se dan por los sensores de temperatura (termopares) conectados a un software con control automático.

Solución 3: El tercer diseño considera la practicidad del ensayo y tecnología como base, sacrificando economía y simplicidad en el diseño. La preparación y selección de la muestra se da forma manual, pues hay que preparar y verificar la muestra que cumplan los requerimientos de la norma del producto. El sistema mecánico para permitir el ingreso y el cierre del espacio para la muestra considera cuatro pistones en la parte superior de una de las placas frías y otros cuatro en la parte inferior de la otra permitiendo el movimiento. Este sistema de movimiento está compuesto por un compresor y válvulas. Luego, el proceso de generar el flujo de calor direccional se realiza mediante tubos que circulan agua tanto en la placa caliente y las frías. Cada una de estas conectadas a un baño térmico, que elevan la temperatura en el caso de la placa caliente y enfrían en caso de las placas frías. La adquisición de datos y el control del sistema térmico se dan por los sensores de temperatura (termopares) conectados a un software con control automático.

2.1.4 Valoración técnico - económica

Para elegir el concepto de solución óptimo se realiza un análisis que sigue el procedimiento de la norma DIN VDI 2225 que considera criterios técnicos y económicos.

Tabla 2.4 Valoración técnica (Fuente: propia)

Valor técnico (Xi)									
Variantes de concepto/proyecto		Solución 1		Solución 2		Solución 3		Solución Ideal	
Criterios de evaluación	Pond.	Puntaje		Puntaje		Puntaje		Puntaje	
Eficiencia y efectividad*	4	2	8	4	16	3	12	4	16
Seguridad	4	4	16	4	16	4	16	4	16
Confiabilidad*	4	2	8	4	16	3	12	4	16
Modularidad	2	4	8	3	6	2	4	4	8
Maniobrabilidad*	4	2	8	3	12	4	16	4	16
Espacio ocupado	4	4	16	3	12	2	8	4	16
Fácil Montaje	3	4	12	2	6	3	9	4	12
Fácil Mantenimiento*	3	4	12	3	9	2	6	4	12
Puntaje Máximo	28	26	88	26	93	23	83	32	112
Valor técnico Xi		0.79		0.83		0.74		1.00	
Orden		1		2		3		3	

Tabla 2.5 Valoración económica (Fuente: propia)

Valor económico (Yi)									
Variantes de concepto/proyecto		Solución 1		Solución 2		Solución 3		Solución Ideal	
Criterios de evaluación	Pond.	Puntaje		Puntaje		Puntaje		Puntaje	
Inversión inicial	4	4	16	3	12	2	8	4	16
Vida útil	3	4	12	3	9	2	6	4	12
Operación	4	2	8	3	12	4	16	4	16
Mantenimiento	3	4	12	3	9	2	6	4	12
Eficiencia	3	4	12	3	9	2	6	4	12
Puntaje Máximo	17	18	60	15	51	12	42	20	68
Valor Económico Yi		0.88		0.75		0.62		1.00	
Orden		1		2		3		3	

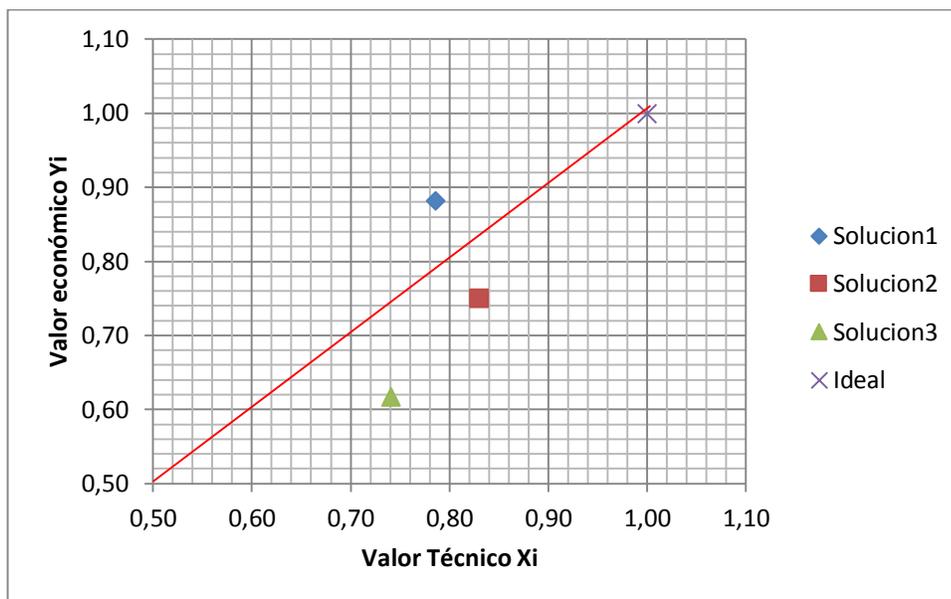


Figura 2. 3 Evaluación técnico económica (Fuente: Elaboración propia)

2.1.5 Concepto de solución óptimo

El concepto solución óptimo es aquel que cumple con las valoraciones técnicas y económicas de manera equilibrada, gráficamente se representa como la distancia del punto hacia la pendiente ideal ($n=1$). Entonces, se elige como solución óptima al concepto solución 2. Las ventajas de este concepto de solución radican en el equilibrio de facilidad para la realización del método.

- El sistema de movimiento de placas frías que es compacto y práctico para el usuario. Este sistema de movimiento se encuentra fuera del aparato con lo cual se descarta la posibilidad que altere el ensayo.
- El flujo de calor es uniforme dado la geometría del área de medición y el tipo de calentador usado. El sistema de enfriamiento de las placas frías puede ser dependiente de la red de suministro o independiente si se usa un baño térmico
- La adquisición de datos es en principio mediante control automático para una regulación más rápida en busca del estado térmico estable. Aunque también puede prescindirse de esta y realizarse de forma manual

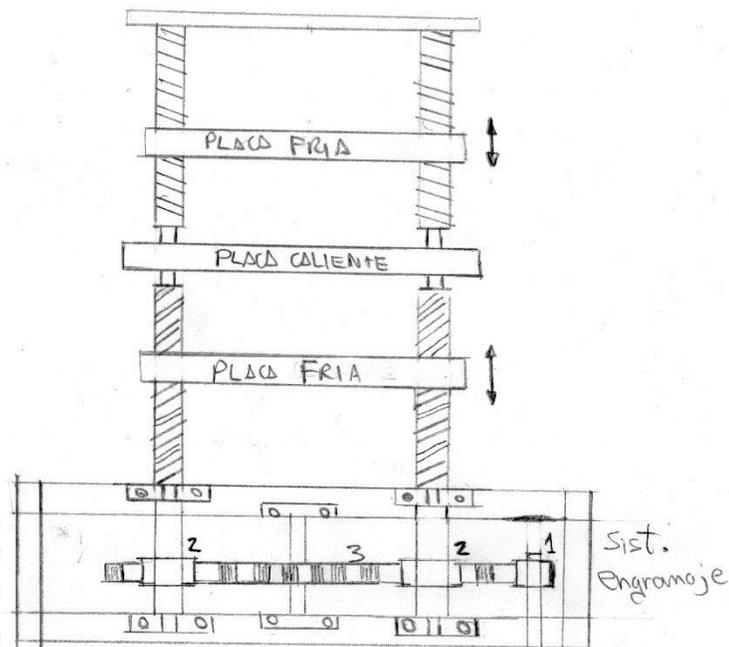


Figura 2. 4 Aparato de placa caliente con guarda (Fuente: Elaboración propia)

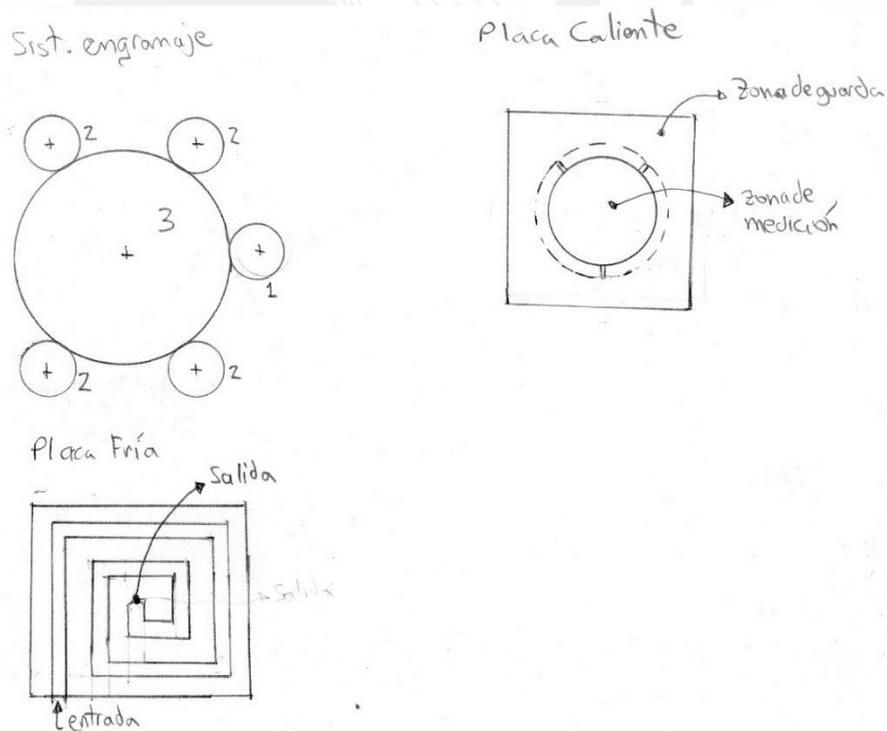


Figura 2. 5 Detalles del aparato (Fuente: Elaboración propia)

2.2 Dimensiones generales

Para iniciar el diseño del sistema de soporte que a la vez será capaz de brindar movimiento a las placas frías. El primer parámetro a definir será el ancho de la muestra y a partir de ello estableceremos las demás dimensiones según la norma europea EN-12664 y la americana ASTM C-177-13.

2.2.1 Ancho de la muestra

El ancho de la muestra influye las demás dimensiones, dado que, a mayor espesor existirá una mayor transferencia lateral que influye directamente en el principio del método con el cual se busca obtener un flujo de calor uniforme y transversal a la muestra. La transferencia lateral se traduce en error para el método. Para estimar el ancho de muestra que se requiere se debe recurrir a qué materiales se desean ensayar, así como las recomendaciones brindadas por las normas. La norma internacional ISO 8302 sugiere dimensiones de equipo de 300 o 500 mm para el caso general del uso del presente método; en caso de ensayos de materiales homogéneos se recomienda dimensiones de 200 mm; para el caso de evaluar el efecto del espesor en la medición de la conductividad térmica se considera dimensiones de 1000 mm. El marco de este trabajo comprende solo el caso general.

Apartado en la Norma	Descripción	Valor
ISO 8302:1991		
1.7.9	dimensiones sugeridas de los equipos	0,3 m; 0,5 m
1.7.9	dimensiones sugeridas de los equipos (sólo para materiales homogéneos)	0,2 m
1.7.9	dimensiones sugeridas del equipo (solamente para valorar el efecto del espesor)	1 m

Figura 2. 6 Tamaños sugeridos de los equipos (Fuente: Norma EN 12664)

Así también la norma europea EN 12664 considera el dimensionamiento a partir del espesor de la muestra. Podemos ver debajo las posibles opciones.

Medidas en su conjunto	Sección medidora	Anchura de la guarda	Espesor máximo (extremo del límite) para la conductividad de la muestra de			Tolerancia de planicie (0,025%)	Espesor mínimo (tolerancia de la planicie)	Hueco máximo	Espesor mínimo ¹⁾ (límite del hueco)
			≤ 0,4	0,8	≥ 1,6				
200	100	50	30	35	40	0,05	10,0	1,25	12,5
300	200	50	35	40	45	0,08	15,0	2,50	25,0
300	150	75	45	55	65	0,08	15,0	1,88	18,8
400	200	100	60	70	85	0,10	20,0	2,50	25,0
400	100	150	80	95	110	0,10	20,0	1,25	12,5
500	300	100	65	80	90	0,13	25,0	3,75	37,5
500	250	125	75	90	100	0,13	25,0	3,13	31,3
500	200	150	85	100	120	0,13	25,0	2,50	25,0
600	300	150	90	110	130	0,15	30,0	3,75	37,5
800	500	150	100	120	150	0,20	40,0	6,25	62,5
800	400	200	120	140	170	0,20	40,0	5,00	50,0
1000	500	250	150	180	210	0,25	50,0	6,25	62,5

1) Espesor aplicable para anchos de huecos de acuerdo con la columna novena de la tabla A.1; para huecos más finos, véase el apartado 5.2.5

Figura 2. 7 Dimensiones según los espesores máximos y mínimos (Fuente: Norma EN 12664)

Por otra parte, se considera las configuraciones que se tienen para los materiales de construcción principalmente los ladrillos de arcilla, ladrillos refractarios y bloques de concreto.

Tabla 2.6 Principales materiales de construcción (Fuente: propia)

Tipo	Dimensiones [cm]	Espesor [cm]	Peso [kg]
Ladrillo Lark Kingkong Tipo IV	9 x 12,5 x 23	12,5	2,7
Ladrillo Lark Caravista	6,5 x 12,5 x 23	12,5	2
Ladrillo Lark Pandereta Lisa	9,5 x 11 x 23	11	2,1
Ladrillo Lark Pandereta acanalada	9 x 10,5 x 23	10,5	1,9
Ladrillo Lark Hueco 12 Liso	12 x 30 x 30	12	6,5
Ladrillo Lark Hueco 15 Acanalado	15 x 30 x 30	15	7,4
Ladrillo Lark Hueco 8 Liso	8 x 30 x 30	8	4,5
Ladrillo Lark Hueco 20 Liso	20 x 30 x 30	20	10
Ladrillo Lark Hueco 25 Liso	25 x 30 x 30	25	12
Ladrillo Lark Hueco 15 Liso	15 x 30 x 30	15	7,8
Ladrillo Lark Pastelero	3 x 25 x 25	3	2,4

Ladrillo Schemin refractario $\frac{3}{4}$ "	10 x 20 x 1,9	1,9	1,5
Ladrillo Schemin refractario 1"	10 x 20 x 2,5	2,5	1,9
Ladrillo Schemin refract. $1\frac{1}{4}$ "	10 x 20 x 3,1	3,1	1,86
Ladrillo Unicon concreto	13 x 9 x 22	13	4,5
Bloque Unicon Concreto B9	9 x 19 x 39	9	10,4
Bloque Unicon Concreto B12	12 x 19 x 39	12	11,8
Bloque Unicon Concreto B14	14 x 19 x 39	14	12,3

Entonces, se considera para el presente diseño se considerará un espesor máximo de muestra de 65 mm para materiales con conductividad térmica mayor a 1,6; 55 mm para materiales con conductividad térmica de 0,8; 45 mm para materiales con conductividad térmica menor a 0,4 y se permite la interpolación para determinar el espesor de muestra para conductividades térmicas intermedias [11]. Este dispositivo permitirá ensayar materiales de construcción como arcilla, el hormigón, cemento, madera, adobe, asfalto, refractarios, etc. Así también, permitirá ensayar algunos de los elementos constructivos mostrados en la tabla 2.5 como ladrillos pasteleros o ladrillos refractarios usados en enchapados.

2.2.2 Superficie de medición

Las superficies de medición convencionales son geoméricamente cuadradas y su elección se basa en la facilidad para la colocación y mantenimiento de calentadores distribuidos. Sin embargo, una superficie de geometría circular facilita el análisis de la transferencia de calor y errores en los bordes de la muestra [10]. Por esta razón se ha seleccionado un área de medición circular. La norma ASTM recomienda que la relación entre el área de medición y el espesor de la muestra sea aproximadamente de 3 a 1. Por otra parte, la norma europea señala valores estandarizados que se muestra en la tabla 1.3. Por tanto, el área de medición será de 150 mm de diámetro.

2.2.3 Superficie de guarda

Se ha considerado que la dimensión del ancho de la guarda sea aproximadamente igual a la mitad de la dimensión lineal de la sección de medición para reducir la pérdida de calor a

través de los bordes a niveles aceptables según la norma ASTM C-177-13 [9]. Esta condición coincide con la tabla 1.3 señalada en la norma europea. Entonces, la superficie tendrá un ancho de 75 mm. El exterior de la guarda será cuadrada para permitir la colocación de los soportes.

2.2.4 Distancia de separación entre el área de medición y de guarda

La norma europea señala para el área de medición seleccionada se debe tener un valor de “hueco” máximo de 1,88 mm. Esta dimensión fue corroborada con la relación 2.01 dada por la norma americana:

$$A_g \leq \frac{5}{100} * A_m \quad (2.1)$$

$$R_m = 75 \text{ mm}$$

$$\pi * R_g^2 - \pi * R_m^2 \leq \frac{5}{100} * \pi * R_m^2$$

$$R_g \leq 76,852 \text{ mm}$$

$$D_s = R_g - R_m \quad (2.2)$$

$$D_s \leq 1,852 \text{ mm}$$

Se concluye que los resultados obtenidos son muy similares, por tanto se considera que la distancia de separación será 1,85 mm.

2.2.5 Dimensiones de la muestra

La muestra debe cubrir toda el área de medición. Para la guarda puede considerarse un material de similares propiedades, pero se recomienda que sea del mismo material que el usado en el ensayo. La superficie de la muestra puede ser circular o cuadrada de 230 mm de lado o diámetro. El espesor como se mencionó en 2.2.1 y depende de la conductividad térmica que posea la muestra. El rango de espesores establecidos para el ensayo está disponible desde 45 mm hasta 65 mm, el cual será tomado en cuenta para grado de movimiento que permitirán las barras roscadas.

2.3 Barras roscadas

Las barras son de material SAE 1045 y poseen un roscado superior e inferior conocido cuyo principio de funcionamiento se basa en los tornillos de traslación o potencia. Se emplea los apuntes de los profesores brindados en el curso de “elementos de máquinas 1” sobre tornillos de traslación, el cual se encuentra en los anexos para su revisión.

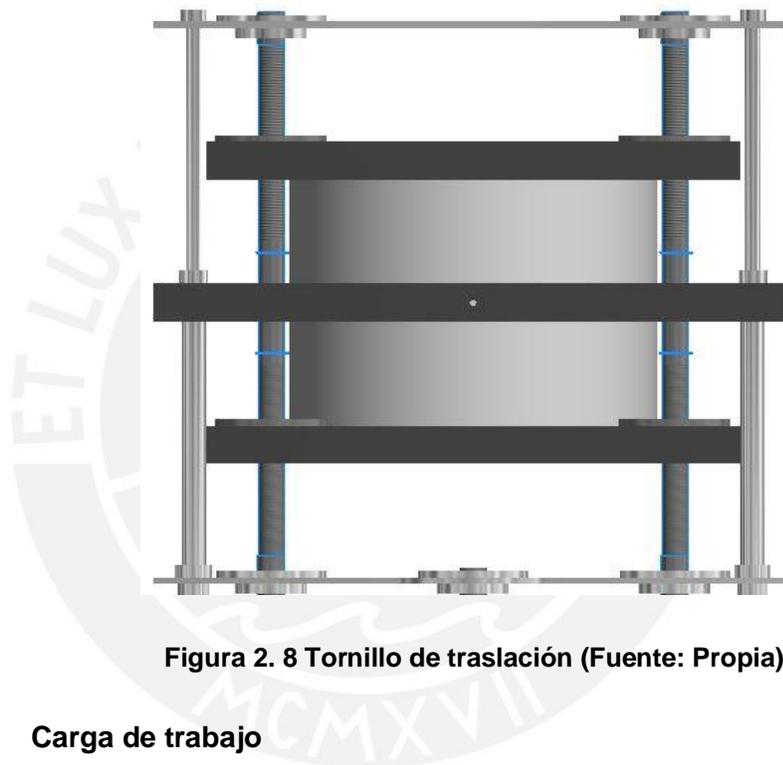


Figura 2. 8 Tornillo de traslación (Fuente: Propia)

2.3.1 Carga de trabajo

Se determina la carga que soportara los tornillos de traslación y para ello consideraremos la condición más crítica que es cuando se ensaya dos muestras de 65 mm de espesor. Para establecer el material nos basaremos en el material de mayor densidad en las tablas de materiales de construcción de la norma argentina mostradas en el capítulo 1. Según este apartado el hormigón puede tener hasta 2500 kg/m^3 . También se considera la placa de duraluminio en el cálculo y un sobredimensionamiento de 1,6 recomendado por la norma peruana de edificaciones y estructuras. La carga F_2 , que es la máxima y corresponde al peso de la placa fría y la muestra dividido entre los 4 soportes, se aplica en los cuatros tornillos inferiores como se ve en la figura 8. De similar manera, para la carga F_1 que

corresponde al peso de la placa fría que se aplica en los tornillos superiores y que es menor puesto que solo considera el peso de sí misma.

$$F_2 = \frac{(\delta_m * e_m * l_m^2 + \delta_c * e_c * l_c^2)}{4} * 1,6 * g \quad (2.3)$$

$$F_2 = \frac{\left[2500 \frac{kg}{m^3} * 0,065m * (0,230m)^2 + 3053 \frac{kg}{m^3} * 0,024m * (0,335m)^2 \right]}{4} * 1,6$$

$$* 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$F_2 = 121,922 N$$

$$F_1 = \frac{(\delta_c * e_c * l_c^2)}{4} * 1,6 * g \quad (2.4)$$

$$F_1 = \frac{\left[3053 \frac{kg}{m^3} * 0,024m * (0,335m)^2 \right]}{4} * 1,6 * 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$F_1 = 32,267 N$$

El sistema de soporte será por medio de cuatro barras roscadas como se determinó en el capítulo 1. El sistema de soporte se analizará bajo el concepto de tornillo de traslación [13].

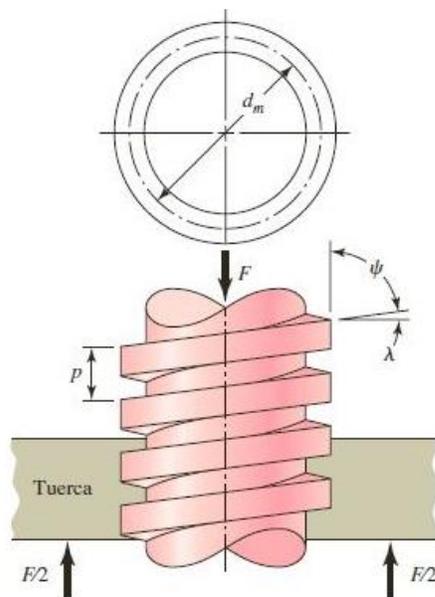


Figura 2. 9 Parte de un tornillo de potencia (Fuente: Adaptado de [13])

2.3.2 Características del roscado

Se analiza el roscado inferior dado que es el más crítico. La norma DIN 103 (actualmente DIN en ISO) establece diámetros para roscas trapezoidales que nos servirán de referencia para los cálculos. La característica del roscado es de tipo trapezoidal, diámetro nominal de 16 mm y paso 2 mm, pues éste forma parte de un árbol que debe apoyarse y ensamblarse en los rodamientos que para esta dimensión son de alta demanda comercial. También las tuercas para trasladar la carga se fabrican, un diámetro menor dificulta el ingreso de la cuchilla. Sin embargo, para efectos de cálculo se ha considerado las dimensiones mínimas siendo el diámetro nominal 9 mm y paso 2 mm, condición para que no falle por pandeo ni por resistencia. La región de las barras que pueden estar bajo pandeo es de 160 mm. Las demás dimensiones se pueden encontrar en los planos.

Tabla 2.7 Extracto de la norma DIN103 (Fuente: propia)

Pase diámetro nominal (d)			Paso (P)	Diámetro de flanco (d ₂ =D ₂)	Diámetro exterior (D ₄)	Diám. de base	
Serie 1	Serie 2	Serie 3				d ₃	D ₁
8			1,5	7,250	8,300	6,200	6,500
	9		1,5	8,250	9,300	7,200	7,500
			2	8,000	9,500	6,500	7,000
10			1,5	9,250	10,300	8,200	8,500
			2	9,000	10,500	7,500	8,000
	11		2	10,000	11,500	8,500	9,000
			3	9,500	11,500	7,500	8,000
12			2	11,000	12,500	9,500	10,000
			3	10,500	12,500	8,500	9,000
	14		2	13,000	14,500	11,500	12,000
			3	12,500	14,500	10,500	11,000
16			2	15,000	16,500	13,500	14,000
			4	14,000	16,500	11,500	12,000

2.3.3 Verificación del roscado inferior por la condición de pandeo

Cuando la relación entre la longitud del tornillo (L) y el diámetro de base (d₃) es mayor que 15 se recomienda analizar el efecto del pandeo.

$$\frac{L}{d_3} = \frac{160 \text{ mm}}{6,5 \text{ mm}} = 24,615 > 15 \tag{2.5}$$



Figura 2. 10 Efecto del pandeo apoyo libre-empotrado (Fuente: Adaptado de [13])

El caso para el análisis por pandeo de las barras roscadas se considera que son del tipo apoyo libre en la placa caliente y un apoyo empotrado (la zona crítica se da desde la ubicación de la placa caliente hacia la zona inferior). La condición de empotramiento se verifica para un apoyo mínimo de 12 mm de longitud y 8 mm de diámetro en la siguiente relación

$$\frac{m}{d} \geq 1,5 \text{ a } 2 \quad (2.6)$$

$$\frac{m}{d} = \frac{12}{8} = 1,5$$

Se determina el esfuerzo de compresión en el tornillo

$$\sigma_c = \frac{(F_1 + F_2)}{A_3} = \frac{4 * (F_1 + F_2)}{\pi * d_3^2} \quad (2.7)$$

$$\sigma_c = \frac{4 * 154,189}{\pi * 6,5^2} = 4,647 \frac{N}{mm^2}$$

Luego, se estima el valor del esfuerzo límite definido de la siguiente manera

$$\lambda = \frac{8 * L}{d_3} \quad (2.8)$$

$$\lambda = \frac{8 * 160}{6,5} = 196,923$$

$$\sigma_{lim} = \frac{\pi^2 * E}{\lambda^2} \quad (2.9)$$

$$\sigma_{lim} = \frac{\pi^2 * 190 * 10^3}{196,923^2} = 48,357 \frac{N}{mm^2}$$

Entonces, se verifica que la relación entre el esfuerzo límite y esfuerzo de compresión (Factor de seguridad) sea mayor a 8, recomendado.

$$FS = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma_c} = 10,4 \quad (2.10)$$

2.3.4 Verificación del roscado inferior por la condición de resistencia

Se calcula el esfuerzo equivalente y debe ser menor que el esfuerzo admisible. Primero, se determina el momento tangencial necesario para elevar la carga.

$$\varphi = \operatorname{atan}\left(\frac{P}{\pi * d_2}\right) \quad (2.11)$$

$$\varphi = \operatorname{atan}\left(\frac{2}{\pi * 8}\right) = 0,079 \operatorname{rad}$$

$$\rho = \operatorname{atan}\left(\frac{\mu}{\cos(\beta)}\right) \quad (2.12)$$

$$\rho = \operatorname{atan}\left(\frac{0,1}{\cos(15^\circ)}\right) = 0,103 \operatorname{rad}$$

$$M_{t2} = F_2 * \tan(\rho + \varphi) * \frac{d_2}{2} \quad (2.13)$$

$$M_{t2} = 121,922 * \tan(0,079 + 0,103) * \frac{8}{2} = 90,04 \operatorname{N} * \operatorname{mm}$$

Luego, se determina el esfuerzo equivalente en la sección efectiva del tornillo (d_s).

$$d_s = \frac{d_2 + d_3}{2} = 7,25 \operatorname{mm} \quad (2.14)$$

$$\tau = \frac{16 * M_{t2}}{\pi * d_s^3} \quad (2.15)$$

$$\tau = \frac{16 * 90,04}{\pi * 7,25^3} = 1,203 \frac{\operatorname{N}}{\operatorname{mm}^2}$$

$$\sigma_s = \frac{4 * F_2}{\pi * d_s^2} \quad (2.16)$$

$$\sigma_s = \frac{4 * 121,922}{\pi * 7,25^2} = 2,953 \frac{\operatorname{N}}{\operatorname{mm}^2}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_s^2 + 3 * \tau^2} \quad (2.17)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{2,953^2 + 3 * 1,203^2} = 3,615 \frac{\operatorname{N}}{\operatorname{mm}^2}$$

$$\sigma_{adm} = 0,13 * \sigma_B \quad (2.18)$$

$$\sigma_{adm} = 0,13 * 310 = 40,3 \frac{N}{mm^2}$$

Por último, la expresión 2.19 muestra que el esfuerzo equivalente es un valor confiable, aunque existe un aparente sobredimensionamiento limitado por la condición de pandeo.

$$\sigma_{eq} < \sigma_{adm} \quad (2.19)$$

$$3,615 \frac{N}{mm^2} < 40,3 \frac{N}{mm^2}$$

2.3.5 Verificación de la tuerca por aplastamiento

Se considera el desgaste de los flancos de los filetes del tornillo y la tuerca debido al deslizamiento de uno contra el otro. Esa es la razón por la que se brinda la siguiente expresión

$$p = \frac{(F_2 + F_1) * h}{m * d_2 * \pi * H_1} \quad (2.20)$$

$$p = \frac{(F_2 + F_1) * \frac{P}{n}}{m * d_2 * \pi * (0,5 * P)} = \frac{(121,922 + 32,267) * \frac{2}{1}}{24 * 8 * \pi * (0,5 * 2)} = 0,5 \frac{N}{mm^2}$$

La expresión 2.21 asegura que la presión en los perfiles de la tuerca de bronce cumpla la verificación para evitar que falle bajo esta condición.

$$p < 5 \frac{N}{mm^2} \quad (2.21)$$

$$0,5 \frac{N}{mm^2} < 5 \frac{N}{mm^2}$$

2.3.6 Momento torsor total aplicado en el roscado inferior para elevar la carga

El momento total para elevar la carga considera la fuerza tangencial para elevar la carga y la fuerza para superar la fricción del apoyo.

$$M_{R2} = F_2 * u_R * \frac{D_m}{2} \quad (2.22)$$

$$M_{R2} = 121,922 * 0,1 * \frac{10}{2} = 60,961 \text{ N} * \text{mm}$$

$$M_{T2} = M_{t2} + M_{R2} = 151,001 \text{ N} * \text{mm} \quad (2.23)$$

2.3.7 Momento torsor total aplicado en el roscado superior para elevar la carga

De manera similar al desarrollo para la carga F_3 , se calcula el momento total para elevar la carga en el soporte superior depende de la carga F_1 .

$$M_{T1} = M_{t1} + M_{R1} \quad (2.24)$$

$$M_{T1} = 32,267 * \tan(0,079 + 0,103) * \frac{8}{2} + 32,267 * 0,1 * \frac{10}{2}$$

$$M_{T1} = 23,829 + 16,133 = 39,963 \text{ N} * \text{mm}$$

2.3.8 Rendimiento mecánico en la elevación

Se determina el rendimiento total del tornillo durante la elevación con la expresión 2.25 considerando tanto el efecto del apoyo como el efecto del momento tangencial de la carga.

$$\eta = \frac{1}{\frac{\tan(\rho + \varphi)}{\tan(\varphi)} + \frac{\mu_R * \pi * D_m}{P}} \quad (2.25)$$

$$\eta = \frac{1}{\frac{\tan(0,103 + 0,079)}{\tan(0,079)} + \frac{0,1 * \pi * 10}{2}} = 25,7 \%$$

2.3.9 Verificación de la barra roscada por fatiga

El diagrama de cuerpo libre mostrado representa las cargas generadas en la barra roscada. El momento torsor depende de la carga y la suma total será el torque que requiere transmitir el piñón.

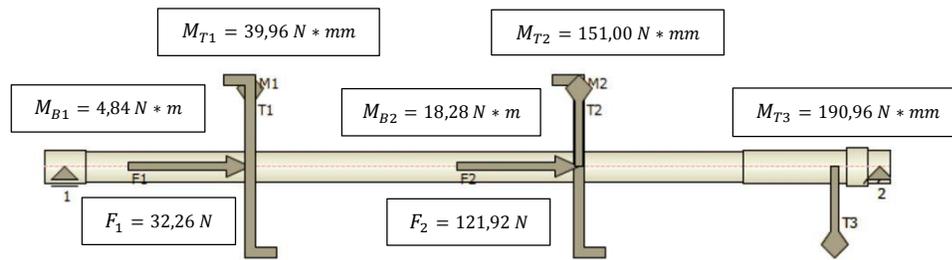


Figura 2. 11 Árbol de transmisión (Fuente: Autodesk Inventor)

Luego de calcular y hallar todas las fuerzas que actúan sobre el árbol, se muestran los diagramas correspondientes cuyas expresiones han sido obtenidas del programa Autodesk Inventor. Las expresiones mostradas pueden ser revisadas en la opción de ayuda del Inventor.

El diagrama de fuerzas de corte sigue la expresión

$$T_{(z)} = - \int q(z) * dz + \sum_0^n F \tag{2.26}$$

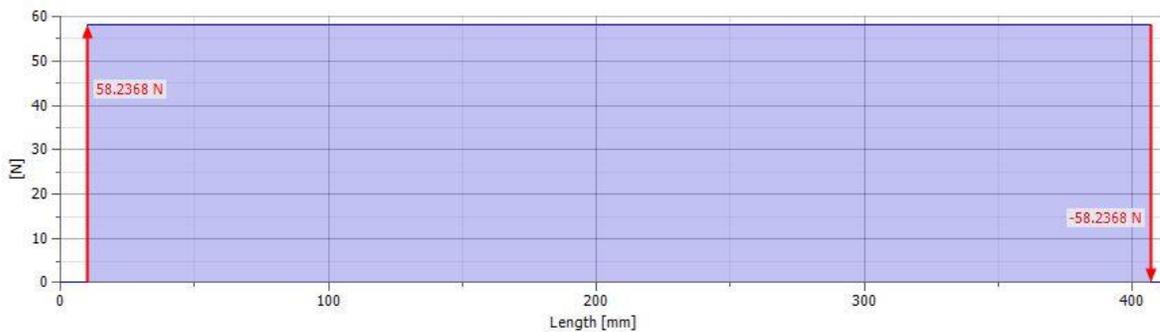


Figura 2. 12 Diagrama de fuerzas de corte (Fuente: Autodesk Inventor)

El diagrama de momento flector sigue la expresión

$$M_B(z) = \int T_{(z)} * dz \sum_0^n M_B \tag{2.27}$$

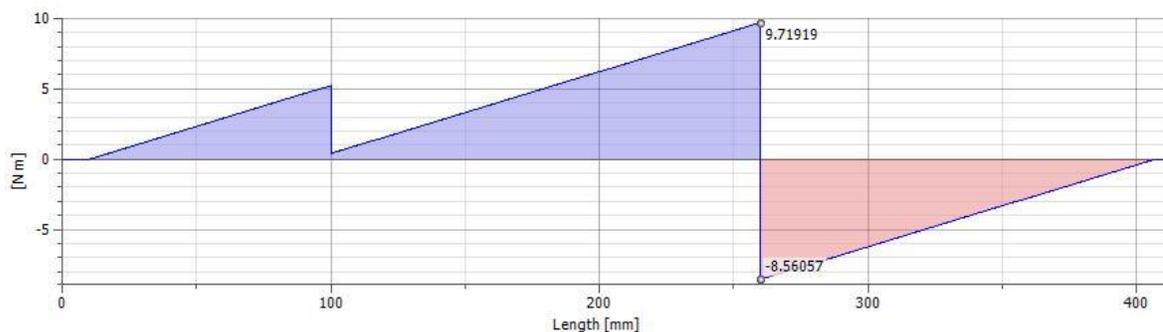


Figura 2. 13 Diagrama de momento flector (Fuente: Autodesk Inventor)

Luego, se obtienen los diagramas de esfuerzos. El diagrama de esfuerzos de flexión se calcula con las siguientes expresiones

$$\sigma_B(z) = \frac{M_B(z)}{W_B(z)} \quad (2.28)$$

$$W_B(z) = \frac{\pi * d_z^3}{32} \quad (2.29)$$

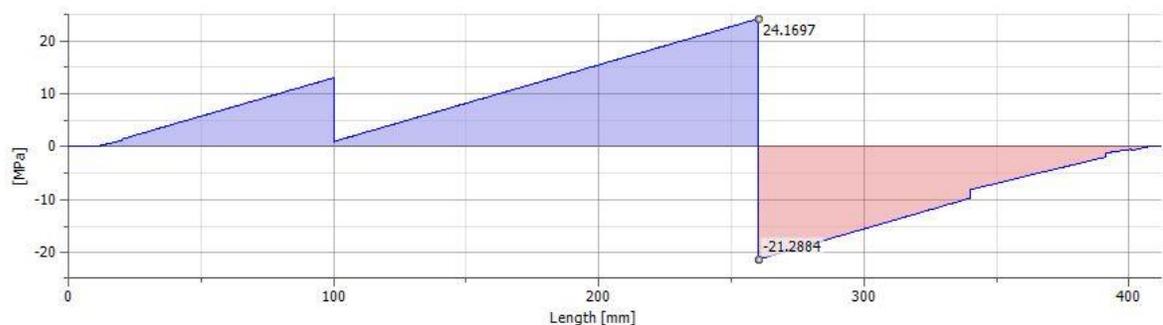


Figura 2. 14 Diagrama de esfuerzos de flexión (Fuente: Autodesk Inventor)

El diagrama de esfuerzos de corte se calcula con las siguientes expresiones

$$\tau_S(z) = \frac{T(z)}{S(z)} \quad (2.30)$$

$$S(z) = \frac{\pi * d_z^2}{4} \quad (2.31)$$

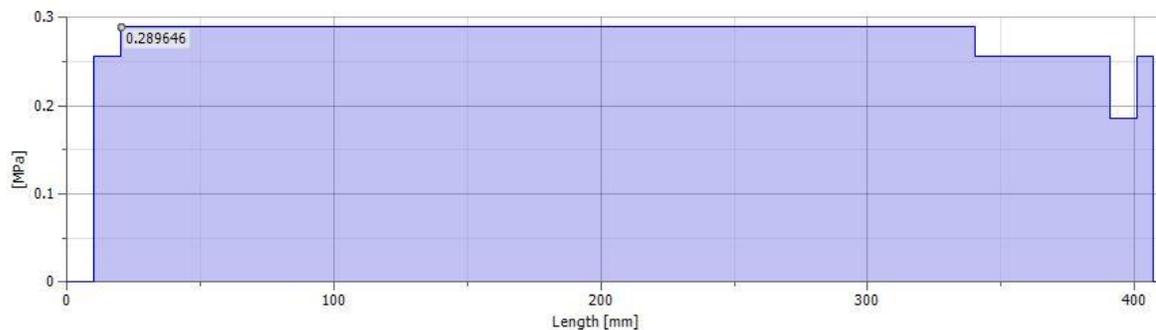


Figura 2. 15 Diagrama de esfuerzos de corte (Fuente: Autodesk Inventor)

El diagrama de esfuerzos de torsión se calcula con las siguientes expresiones

$$\tau_{(z)} = \frac{\sum_0^n M_T(z)}{W_{(z)}} \quad (2.32)$$

$$W_{(z)} = \frac{\pi * d_z^3}{16} \quad (2.33)$$

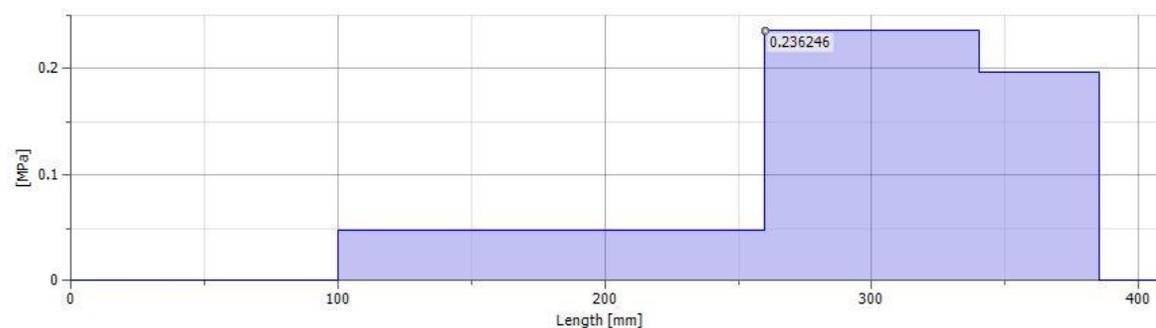


Figura 2. 16 Diagrama de esfuerzos de torsión (Fuente: Autodesk Inventor)

El esfuerzo de tensión se calcula con las siguientes expresiones

$$\sigma_{T(z)} = \frac{\sum_0^n F_z}{S_{(z)}} \quad (2.34)$$

$$S_{(z)} = \frac{\pi * d_z^2}{4} \quad (2.31)$$

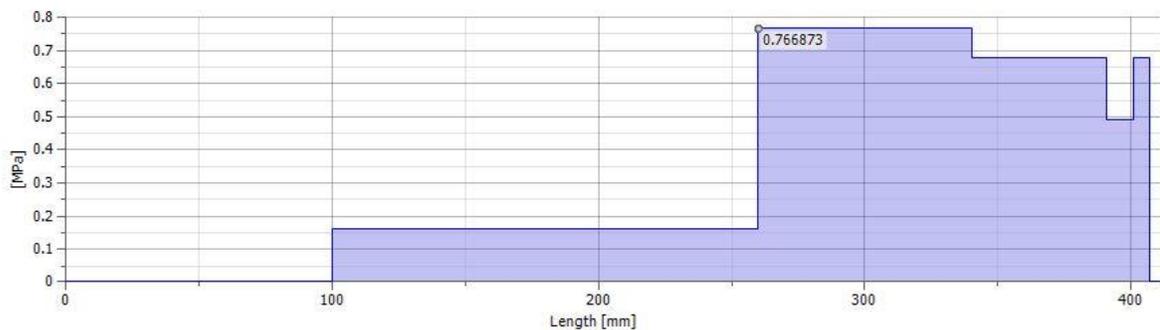


Figura 2. 17 Diagrama de esfuerzos de tensión (Fuente: Autodesk Inventor)

2.4.1 Verificación a la fatiga

Con los esfuerzos calculados anteriormente se calcula el esfuerzo equivalente para resistencia a la fatiga que sigue la expresión C. Bach cuyas constantes se pueden revisar en el anexo se muestra a continuación

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{faALT}}{1,73 * \tau_{faPUL}} \tag{2.35}$$

$$\sigma_{eqa} = \sqrt{\left[\frac{\beta_f}{C_S * C_t * C_{temp}} * (\sigma_B + \sigma_T) \right]^2 + 3 * \left[\frac{\beta_f}{C_S * C_t * C_{temp}} * \alpha_0 * (\tau + \tau_S) \right]^2} \tag{2.36}$$

El valor crítico se encuentra en x=355 mm, para ese valor los valores correspondientes se reemplazan en 2.35. La expresión 2.36 depende del material del árbol que es AISI 304.

$$\alpha_0 = \frac{200}{1,73 * 170} = 0,68 \tag{2.35}$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{\left[\frac{2}{0,9 * 0,65 * 1} * (15,03 + 0,85) \right]^2 + 3 * \left[\frac{2}{0,9 * 0,65 * 1} * 0,68 * (0,15 + 0,27) \right]^2} \\ & = 54,317 \frac{N}{mm^2} \end{aligned} \tag{2.36}$$

Este valor hallado debe ser menor que el esfuerzo admisible que se determina por la siguiente expresión

$$\sigma_{aAdm} = \frac{\sigma_{faALT}}{FS_a} \tag{2.37}$$

$$\sigma_{aAdm} = \frac{200}{2.5} = 80 \frac{N}{mm^2}$$

2.4.2 Diámetro mínimo

Luego, se realiza un cálculo tentativo para determinar el diámetro del eje en la sección crítica (X=260mm). Para determinar el diámetro mínimo se utilizará la teoría del esfuerzo cortante máximo que viene dado por la siguiente expresión

$$d_{min} = \left[\frac{32 * FS_a}{\pi * \sigma_F} * \sqrt{M_B^2 + M_T^2} \right]^{1/3} \quad (2.38)$$

$$d_{min} = \left[\frac{32 * 2,5}{\pi * 310} * \sqrt{(24,17)^2 + (0,19)^2} \right]^{1/3} = 14,70 \text{ mm}$$

El diámetro de las demás secciones será menor según los gráficos de esfuerzos observados. Para realizar el mecanizado del material se ha decidido mantener casi un mismo diámetro tomando como referencia el diámetro mínimo para reducir el costo que implicaría un mayor desbaste. Entonces se ha seleccionado que las barras tendrán un diámetro de 16 mm con algunos resaltes mostrados en el plano para realizar su ensamblaje. Además, hay que considerar el aspecto constructivo de las piezas que se ensamblaran a estas barras como los rodamientos y apoyos. Para el diámetro elegido, los rodamientos son comerciales y fáciles de adquirir, en tanto que, un diámetro menor dificultaría la fabricación de los apoyos debido al poco espacio para el ingreso de la cuchilla. A manera de información se muestra un gráfico con los diámetros recomendados según la herramienta de cálculo de inventor que es muy próxima a las realizadas líneas arriba.

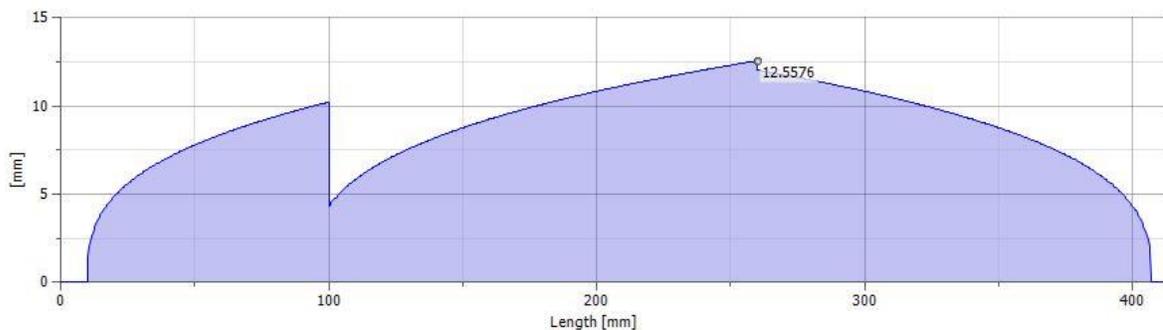


Figura 2. 18 Diagrama de diámetros ideales (Fuente: Autodesk Inventor)

2.4 Sistema de engranajes

La transmisión hacia las cuatro barras roscadas se realiza por cuatro piñones unidos a cada barra que se moverán en conjunto por medio de una corona. Los engranajes serán de acero SAE 1045 y tendrán las siguientes características

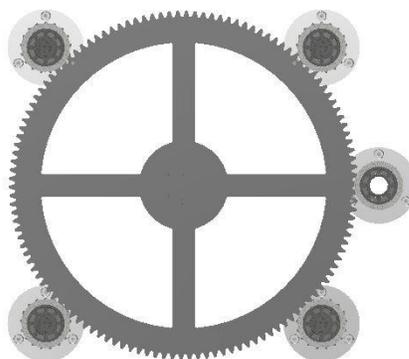


Figura 2. 19 Sistema piñón-corona (Fuente: propia)

Tabla 2.8 Características de los engranajes

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidades
m_n	Módulo normalizado según DIN780	2,5	mm
α_n	Angulo de presión normal	20	°
β_e	Angulo de la hélice	0	°
Z_1	Numero de dientes del piñón	17	
Z_2	Numero de dientes de la corona	126	
i	Relación de transmisión	7,4	
b_{e1}	Ancho de diente del piñón	20	mm
b_{e2}	Ancho de diente de la corona	20	mm
X_1, X_2, k	Factores de corrección	0	

Tabla 2.9 Características de SAE 1045

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidades
R_m	Rugosidad media	6	μm
HB	Dureza	163	$\frac{N}{mm^2}$
σ_{Flim}	Resistencia a la fatiga (Raiz)	170	$\frac{N}{mm^2}$
σ_{Hlim}	Resistencia a la fatiga (Flanco)	290	$\frac{N}{mm^2}$
E	Módulo de elasticidad	290000	$\frac{N}{mm^2}$

En consecuencia, para validar las características de las tablas anteriores se hacen los siguientes cálculos previos:

El ángulo de presión transversal en el círculo primitivo α_t será equivalente al ángulo de presión normal α_n dado que es un engranaje de dientes rectos y se expresa en forma matemática en la expresión 2.41.

$$\alpha_t = \text{atan}\left(\frac{\tan(\alpha_n)}{\cos(\beta)}\right) \quad (2.39)$$

$$\alpha_t = \text{atan}\left(\frac{\tan(20)}{\cos(0)}\right) = 20^\circ$$

Así también, el módulo tangencial m_t será igual al módulo normal m_n dado la relación matemática mostrada en la expresión 2.40.

$$m_t = \frac{m_n}{\cos(\beta)} \quad (2.40)$$

$$m_t = \frac{2,5}{\cos(0)} = 2,5 \text{ mm}$$

El número virtual de dientes Z_n será numéricamente el mismo que Z , pues estamos frente a engranajes cilíndricos rectos como se muestra en la expresión matemática.

$$Z_{n1} = \frac{Z_1}{\cos(\beta)^3} \quad (2.41)$$

$$Z_{n1} = \frac{17}{\cos(0)^3} = 17$$

$$Z_{n2} = \frac{Z_2}{\cos(\beta)^3} \quad (2.42)$$

$$Z_{n2} = \frac{126}{\cos(0)^3} = 126$$

La distancia entre los centros d_c de cada piñón hacia la corona no necesita realizar corrección, entonces la distancia teórica corregida a' es numéricamente igual a d_c como se muestra en la expresión 2.43.

$$a' = d_c = m_t * \left(\frac{Z_{n1} + Z_{n2}}{2} \right) \quad (2.43)$$

$$a' = d_c = 2,5 * \left(\frac{17 + 126}{2} \right) = 178,75 \text{ mm}$$

La relación de transmisión se muestra en la expresión 2.46 como se muestra

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (2.44)$$

$$i = \frac{126}{17} = 7,4$$

La fuerza tangencial en el diente está definida por relación 2.47 como se muestra

$$F_t = (F_1 + F_2) * \cos(\alpha_t) \quad (2.45)$$

$$F_t = (32,27 + 121,92) * \cos(20^\circ) = 144,89 \text{ N}$$

El diámetro primitivo d , diámetro de círculo exterior d_a y diámetro de círculo base d_b para cada piñón (1) y la corona (2) se definen en las siguientes expresiones

$$d_1 = m_t * Z_{n1} \quad (2.46)$$

$$d_1 = 2,5 * 17 = 42,5 \text{ mm}$$

$$d_{b1} = d_1 * \cos(\alpha_t) \quad (2.47)$$

$$d_{b1} = 42,5 * \cos(20) = 39,937 \text{ mm}$$

$$d_{a1} = d_1 + 2 * m_n * (1 + X_1 + k) \quad (2.48)$$

$$d_{a1} = 42,5 + 2 * 2,5 * (1 + 0 + 0) = 47,5 \text{ mm}$$

$$d_2 = m_t * Z_{n2} \quad (2.49)$$

$$d_2 = 2,5 * 126 = 315 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = d_2 * \cos(\alpha_t) \quad (2.50)$$

$$d_{b2} = 315 * \cos(20) = 296 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = d_2 + 2 * m_n * (1 + X_2 + k) \quad (2.51)$$

$$d_{a2} = 315 + 2 * 2,5 * (1 + 0 + 0) = 320 \text{ mm}$$

El ángulo corregido α'_t es numéricamente igual a α_t , pues no hay corrección en el diente.

$$\alpha'_t = \arccos\left(\frac{m_t}{2 * a'} * (Z_{n1} + Z_{n2}) * \cos(\alpha_t)\right) \quad (2.52)$$

$$\alpha'_t = \arccos\left(\frac{2,5}{2 * 178,75} * (17 + 126) * \cos(20)\right) = 20^\circ$$

Con las variables anteriores ya definidas, el segmento de engrane viene dado por la expresión 2.55.

$$g_a = \frac{1}{2} * \left(\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2}\right) - a' * \sin(\alpha'_t) \quad (2.53)$$

$$g_a = \frac{1}{2} * \left(\sqrt{47,5^2 - 39,937^2} + \sqrt{320^2 - 296^2}\right) - 178,75 * \sin(20) = 12,513 \text{ mm}$$

El paso transversal se determina con la expresión 2.56

$$P_{et} = \pi * m_t * \cos(\alpha_t) \quad (2.54)$$

$$P_{et} = \pi * 2,5 * \cos(20) = 7,38 \text{ mm}$$

Finalmente, el factor de engrane utilizado para determinar Y_ϵ y Y_β , factores de corrección que se detalla más adelante viene dado por la expresión 2.57

$$\epsilon_{\alpha} = \frac{g_a}{P_{et}} \quad (2.55)$$

$$\epsilon_{\alpha} = \frac{12,513}{7,38} = 1,695$$

2.4.1 Resistencia a la fatiga por flexión en la raíz del diente

La verificación de resistencia a la fatiga por flexión en la raíz del diente se realiza tanto en los piñones como en la corona. Los factores K_A , Y_{Fa} , Y_{Sa} , Y_{ϵ} , Y_{β} , Y_{NT} , Y_X , Y_{RrelT} , Y_{drelT1} , Y_{ST} , S_{Flim} y σ_{Flim} se estiman de los gráficos correspondientes a la norma DIN 3990, los cuales se encuentran en el apartado de anexo.

Entonces, para el piñón se verifica que no fallara en la siguiente expresión

$$\sigma_{FN1} \leq \sigma_{FP1} \quad (2.56)$$

$$\frac{F_t}{b_{e1} * m_n} * K_A * Y_{Fa1} * Y_{Sa1} * Y_{\epsilon} * Y_{\beta} \leq \frac{\sigma_{Flim1}}{S_{Flim}} * Y_{ST} * Y_{drelT1} * Y_{RrelT} * Y_X * Y_{NT}$$

$$\frac{144,89}{24 * 2,5} * 1,5 * 3,05 * 1,57 * 0,692 * 1 \leq \frac{50}{1,7} * 2 * 0,98 * 1,02 * 1 * 1,4$$

$$12,01 \frac{N}{mm^2} \leq 82,32 \frac{N}{mm^2}$$

De similar manera se verifica la condición para la corona

$$\sigma_{FN2} \leq \sigma_{FP2} \quad (2.57)$$

$$\frac{F_t}{b_{e2} * m_n} * K_A * Y_{Fa2} * Y_{Sa2} * Y_{\epsilon} * Y_{\beta} \leq \frac{\sigma_{Flim2}}{S_{Flim}} * Y_{ST} * Y_{drelT2} * Y_{RrelT} * Y_X * Y_{NT}$$

$$\frac{144,89}{20 * 2,5} * 1,5 * 2,16 * 1,94 * 0,692 * 1 \leq \frac{50}{1,7} * 2 * 1,01 * 1,02 * 1 * 1,4$$

$$12,6 \frac{N}{mm^2} \leq 84,84 \frac{N}{mm^2}$$

2.4.2 Resistencia a la fatiga por presión en el flanco del diente del piñón

La verificación se realiza en el piñón por ser el elemento más crítico. Los factores K_A , Z_H , Z_E , Z_ε , Z_β , Z_{NT} , Z_L , Z_R , Z_V , Z_W , Z_X , σ_{Hlim} y S_{Hmin} se estiman de los gráficos correspondientes a la norma DIN 3990, los cuales se encuentran en el apartado de anexo.

Entonces, para el piñón se verifica que no fallara en la siguiente expresión

$$\sigma_{HN1} \leq \sigma_{HP1} \quad (2.58)$$

$$\sqrt{\frac{F_t * K_A * (i + 1)}{b_{e1} * d_1 * i}} * Z_H * Z_E * Z_\varepsilon * Z_\beta \leq \frac{\sigma_{Hlim1}}{S_{Hmin}} * Z_{NT} * Z_L * Z_R * Z_V * Z_W * Z_X$$

$$\sqrt{\frac{144,89 * 1,5 * (7,4 + 1)}{20 * 42,5 * 7,4}} * 2,495 * (1,437 * 10^5) * 0,876 * 1$$

$$\leq \frac{270}{1,8} * 1,6 * 1 * 0,925 * 0,90 * 1,175 * 1$$

$$169,268 \frac{N}{mm^2} \leq 234,765 \frac{N}{mm^2}$$

2.5 Soporte del dispositivo

El soporte está conformada por cuatro perfiles circulares que han sido mecanizados y tres placas para permitir el acople de los demás elementos. Son de acero inoxidable A240 C-201. Los diferentes elementos se acoplan entre sí mediante el uso de collarines y prisioneros, dado su simplicidad para el ensamble y la buena precisión que se puede obtener como ventaja a usar soldadura y además, permite el desmontaje de las piezas. La placa inferior del soporte está sometido a una primera carga que está conformada por el peso las placas frías, una muestra, las barras roscadas y los piñones que se distribuyen entre los cuatro puntos de apoyo señalados en la figura. Así también, una segunda carga proviene del piñón motriz y la volante. La tercera carga es dada por la corona. Finalmente, la cuarta carga se aplica directamente en los soportes y es debido al peso de la placa caliente y la otra muestra. Las dimensiones de los elementos se encuentran en los planos dentro del anexo. El peso de las distintas cargas se muestra en la siguiente tabla

Tabla 2.10 Cargas sobre soporte

Tipo de carga vivas	Valor unitario	Valor Neto	Unidad
02 Muestras (Peso máximo)	15,00	30,00	<i>kg</i>
02 Placa frías	8,00	16,00	<i>kg</i>
01 Placa caliente	10,30	10,30	<i>kg</i>
05 piñones	0,21	1,05	<i>kg</i>
01 Corona	0,70	0,70	<i>kg</i>
04 barras roscadas	0,70	2,80	<i>kg</i>
01 volante	1,00	1,00	<i>kg</i>

Con ayuda de la herramienta de cálculo de esfuerzos mediante elementos finitos del software Autodesk Inventor se determina el comportamiento de la pieza.

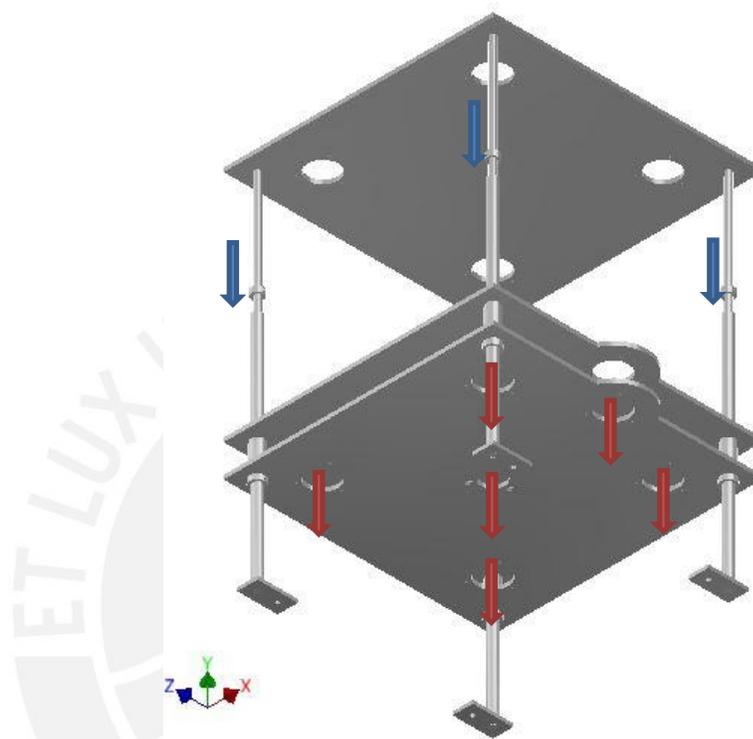


Figura 2. 20 Fuerzas actuantes en el soporte del dispositivo (Fuente: propia)

Para cálculo del soporte soldado se tiene como referencia la norma técnica peruana de edificación E.090: Estructuras metálicas, que posee el respaldo de la AISC (American Institute of Steel Construction). En ella se menciona para el método de LRFD (Load and Resistance Factor Design) se considera que el peso de la estructura debe ser aumentado en 1,2 y el de las cargas vivas en 1,6. Las cargas vivas se consideran en la tabla 2.11. Para estas condiciones, La primera carga aplicada en la placa del soporte tiene un valor de 205 N que dividido entre los cuatro puntos de apoyo se obtiene 51,25 N. La segunda carga aplicada en la placa del soporte tiene un valor 20 N. La tercera carga que también se aplica en la placa tiene un valor de 55 N. La cuarta carga aplicado en las barras del soporte del dispositivo tiene un valor de 255 N que repartido entre los cuatro puntos de apoyo se tiene 63,75 N.

2.6.1 Verificación por resistencia del soporte

La finalidad es obtener el comportamiento del soporte soldado y observar sus partes críticas mediante la herramienta “Stress analysis” que usa la teoría de elementos finitos para desarrollar su estimación. En esta parte, se apreciará la distribución de esfuerzos de von mises, dado que al ser un elemento dúctil es la que toma mayor importancia frente al máximo y mínimo esfuerzo que toman relevancia en elementos frágiles. Se observa en la figura 2.20 y figura 2.21 que el esfuerzo máximo es de 24,76 MPa que es menor al esfuerzo admisible que tiene el valor de 101,2 MPa.

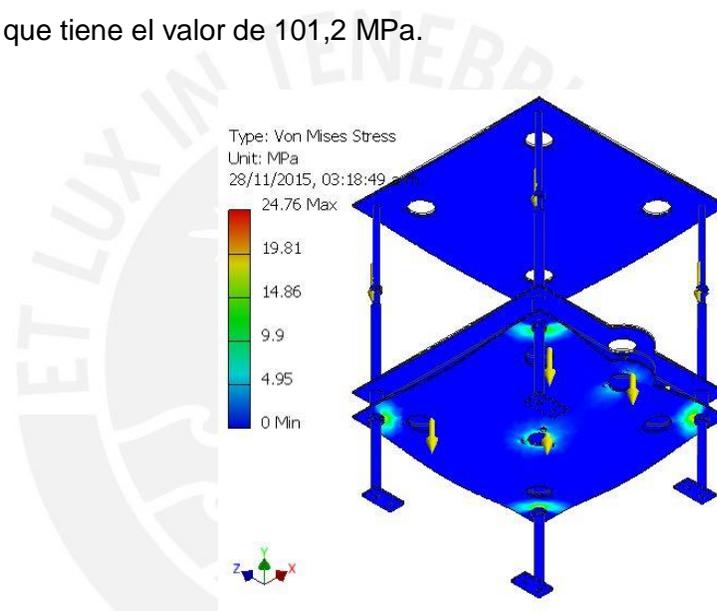


Figura 2. 21 Vista de perspectiva de la distribución de esfuerzos Von Mises en el soporte del dispositivo (Fuente: propia)

2.6.2 Verificación por rigidez del soporte

La deflexión producida en la placa se observa en la figura 2.22 y figura 2.23. Según la norma peruana E0.90 la deflexión lineal máxima es el valor de su longitud, 400 mm, dividido entre 360 veces que nos da el resultado de 1,11 mm de deflexión permitida que es mayor a 0,07267 mm como se observa en la figura 2.22.

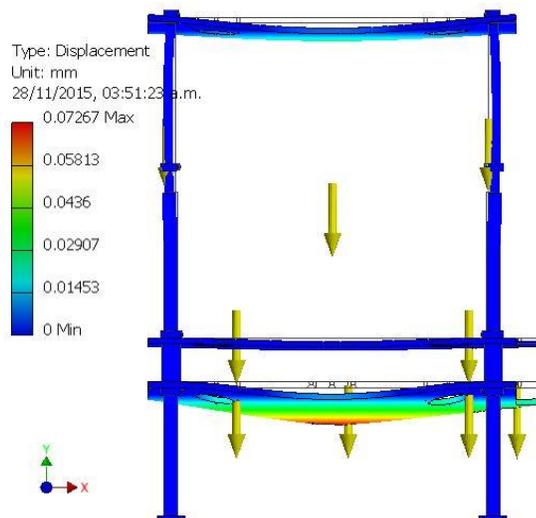


Figura 2. 22 Vista de la variación del desplazamiento (Fuente: propia)

Como resultado de las estimaciones anteriores, se obtiene también el factor de seguridad en base al material del conjunto que es acero inoxidable A240 C-201. En la figura 2.23 podemos ver que el factor de seguridad toma su valor crítico en 8,59.

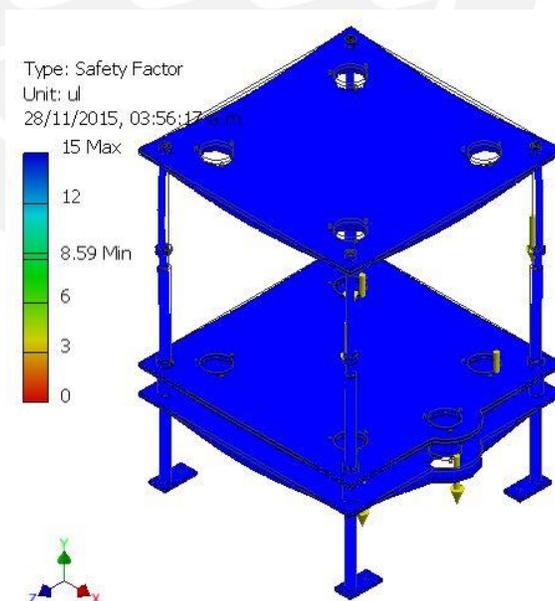


Figura 2. 23 Variación del factor de seguridad en función del esfuerzo aplicado (Fuente: propia)

2.6.3 Verificación al pandeo del perfil tubular

En la gráfica de esfuerzos de von mises se observa que existe una concentración de esfuerzos a considerar en el perfil circular, entonces, se realizará la verificación por pandeo en el tramo inferior que mide 150 mm. La fuerza que actúa como se mencionó anteriormente es de 63,75 N y se considera el factor multiplicativo de 1,6 de la norma de construcción resulta que cada perfil tendrá una carga de 102 N.

Se determina el esfuerzo de compresión en el perfil

$$\sigma_{cs} = \frac{F_{soporte}}{A_4} = \frac{4 * F_{soporte}}{\pi * d_{soporte}^2} \quad (2.59)$$

$$\sigma_{cs} = \frac{4 * 102}{\pi * 15^2} = 0,577 \frac{N}{mm^2}$$

Luego, se estima el valor del esfuerzo límite definido de la siguiente manera

$$\lambda = \frac{8 * L}{d_{soporte}} \quad (2.60)$$

$$\lambda = \frac{8 * 150}{15} = 80$$

Como el valor de λ se encuentra en 60 y 100, el esfuerzo limite viene dado por la siguiente expresión de Tetmajer

$$\sigma_{lims} = (2,5 * \sigma_F - 310,89) - (0,025 * \sigma_F - 5,18) * \lambda \quad (2.61)$$

$$\sigma_{lims} = (2,5 * 310 - 310,89) - (0,025 * 310 - 5,18) * 80 = 293 \frac{N}{mm^2}$$

Entonces, se verifica que el esfuerzo limite supera ampliamente al esfuerzo de compresión principalmente por el efecto del diámetro de la barra circular.

2.6 Sistema de medición

El sistema de medición se conforma por la placa de medición, placa de guarda, las dos placas frías y los sensores de temperatura para la realización del ensayo. El material de las placas es conformada por aluminio que es idónea por su alta conductividad térmica, menor peso y costo menor al de otras opciones como el cobre o acero. Todas las placas serán pintadas de color negro mate para tener una emitancia máxima de 0,8 Las dimensiones de

la placa de medición y placa de guarda se basaron en el análisis de pérdida de calor en los bordes como se muestran en el apartado de aislamiento y pérdidas.

2.7.1 Placa de medición

La placa de medición tiene diámetro de 150 mm y 24 mm de espesor. Se usa un solo calefactor circular cuyo radio será de 53 mm. Además será mecanizado para la colocación del calentador circular y colocación de los tornillos de unión a la placa de guarda. El material utilizado por su fácil maquinabilidad, buena conductividad térmica y disponibilidad comercial en el mercado peruano es la aleación de aluminio AA 6003.

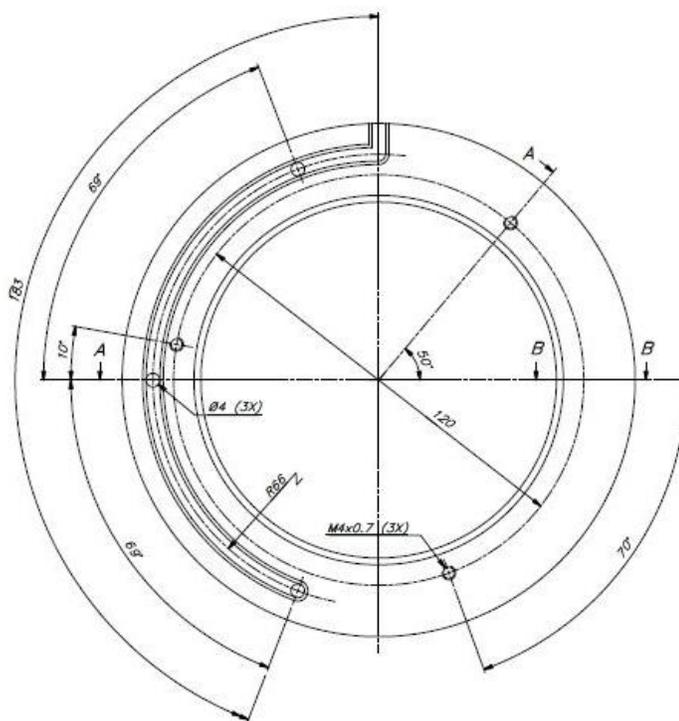
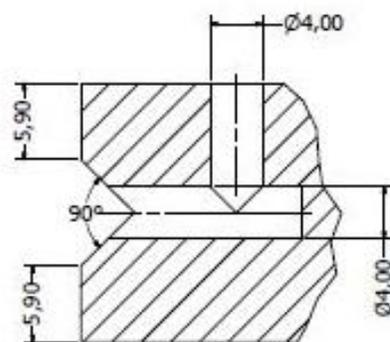


Figura 2. 24 Placa de medición (Fuente: propia)

Para la fijación de la placa de medición hacia la placa de guarda se coloca tres alfileres de acero separados simétricamente. Los alfileres se colocan con la ayuda de un tornillo opresor que los empuja y fija en la placa de guarda. Además, alrededor de la placa existe un desbaste en forma de diamante que es para reducir la transferencia de calor a través de éste.



**Figura 2. 25 Detalle de borde B que muestra el sistema para la colocación del alfiler de acero
(Fuente: propia)**

El sistema de colocación de los alfileres se puede observar en la siguiente figura

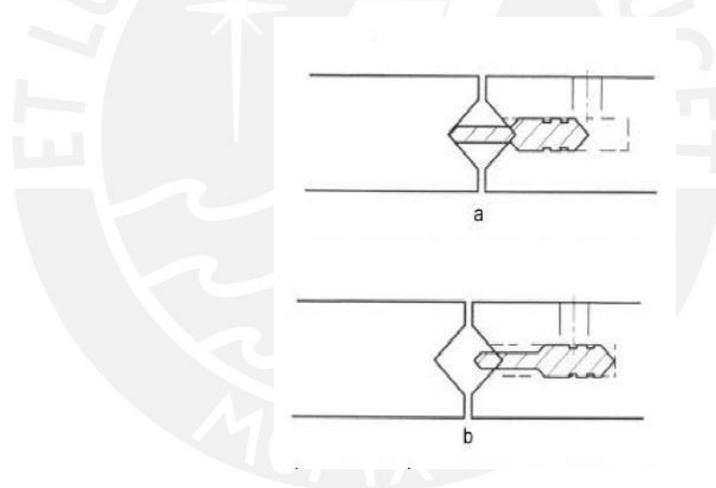


Figura 2. 26 Mecanismo de soporte en la sección de medición a) el alfiler se empuja por medio de un tornillo opresor (no mostrado en la figura) para fijar el disco de la sección de medición. b) el tornillo opresor se quita y se recorre el alfiler al fondo del barreno para poder colocar o quitar el disco de la sección de medición dentro del anillo de guarda [12]

2.7.1.1 Número de calentadores en la placa de medición

La placa de medición requiere uno o más calentadores lineares dependiendo de las dimensiones del aparato. El fin es conseguir una distribución uniforme y casi constante en la sección de medición. Esta condición depende en parte del número de calentadores, por

ello se validará que para las características de nuestra placa de medición en el que usaremos un solo calentador lineal circular para cada una de las placas.

2.7.1.2 Ubicación del calentador lineal circular en la placa de medición

La ubicación radial depende del número de calentadores, dado que se usará un solo calentador la relación tiene la siguiente forma

$$a_1 = \frac{k * b}{\sqrt{n^2 + n}} \quad (2.62)$$

$$a_1 = \frac{1 * 75}{\sqrt{1^2 + 1}} = 53.033 \text{ mm}$$

El calentador flexible elegido es de Nicrom 80-20 de marca MIKAI. El mecanizado contempla un anillo de espesor 2 mm con el radio del calentador calculado líneas arriba y además un agujero para su conexión hacia la fuente de calor.

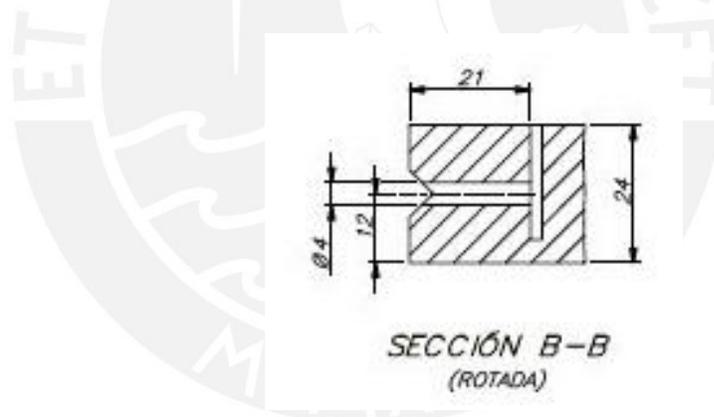


Figura 2. 27 Detalle de borde A y sistema para la colocación del calentador circular (Fuente: propia)

2.7.1.3 Distribución de la temperatura

La distribución radial de temperatura en la placa de medición sigue la siguiente relación

$$\frac{v(r) - V}{V} = \frac{b^2}{2 * \delta_h * e_h * R} * F_{(n, \frac{r}{b})} \quad (2.63)$$

$$\frac{v(r) - 30}{30} = \frac{75^2}{2 * (220 * 10^{-3}) * 24 * (0,5 * 10^6)} * F_{(n, \frac{r}{b})}$$

El factor $F_{(n, \frac{r}{b})}$ depende de la siguiente gráfica para el valor de n igual a 1 calentador e ingresaremos con la relación r/b.

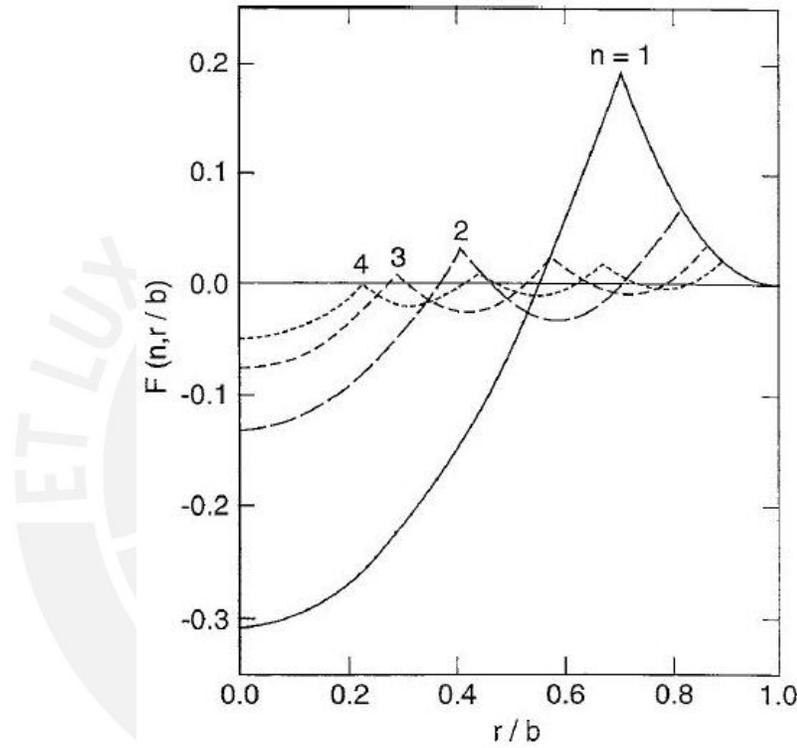


Figura 2. 28 Factor r/b en función de n (Fuente: Norma ASTM C1043)

Resolviendo la igualdad para distintos valores de r en la expresión 2.63 se obtiene los valores para las temperaturas correspondientes y se muestra en la siguiente tabla

Tabla 2.11 Distribución radial de la temperatura en la placa de medición

r (mm)	$v(r)$ (°C)
$r_{max} = 75$	
15	29,891
30	29,938
45	30,019

52.5	30,078
60	30,019

La condición para que sea válida la distribución es que la diferencia máxima sea menor a 1°C según la norma ASTM C 1043.

2.7.2 Placa de guarda

El procedimiento se realiza de manera análoga para la placa de guarda bajo la condición teórica de que la mitad del calor producido fluye hacia el interior y la otra mitad hacia el exterior. Tiene un diámetro interior de 153.70 mm y lado exterior de 300 mm y es de aleación de aluminio AA 6003. La ubicación del calentador es a un diámetro de 237,17 mm que se detalla más adelante. Por último, posee cuatro agujeros que permiten su acople con los soportes roscados y además brinda estabilidad al soporte.

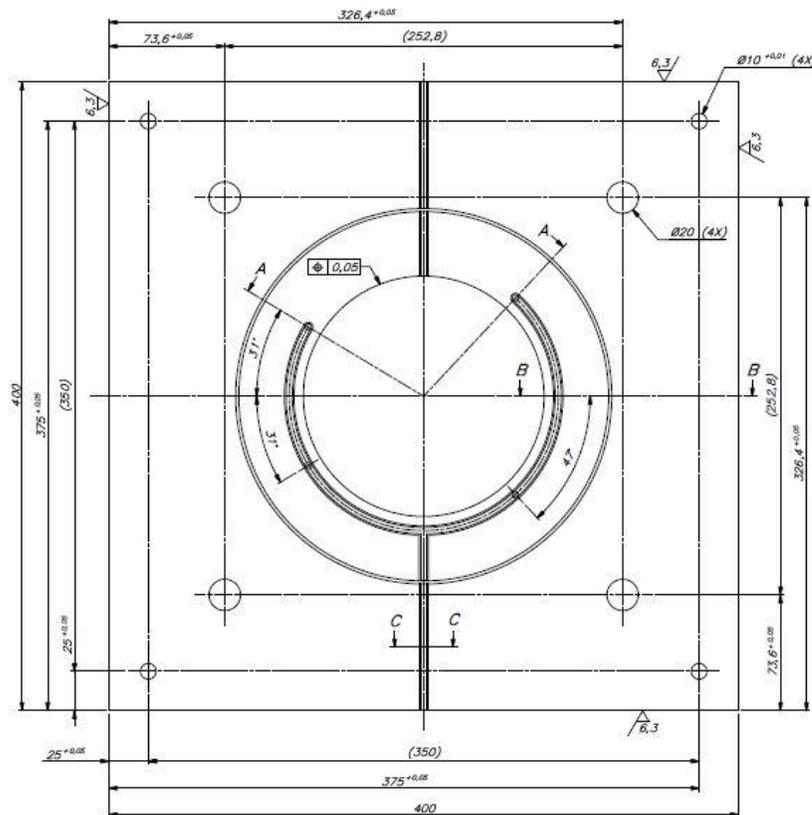


Figura 2. 29 Placa de guarda (Fuente: Propia)

2.7.2.1 Número de calentadores en la placa de guarda

Al igual que en el caso de la placa de medición se tendrá un calentador y se sugiere que en tanto se evite las corrientes de aire con un aislamiento correcto, no se requiere calcular la distribución de temperatura.

2.7.2.2 Ubicación del calentador lineal circular en la placa de guarda

La ubicación radial del calentador c_1 viene dado por las siguientes relaciones

$$A = \frac{\left(\frac{d^2}{b} + 2 * n^2 - 1\right) + \sqrt{\left(\frac{d^2}{b} + 2 * n^2 - 1\right)^2 - 4 * (n^2 + n) * (n^2 - n)}}{2 * (n^2 + n)} \quad (2.64)$$

$$A = \frac{\left(\frac{150^2}{75} + 2 * 1^2 - 1\right) + \sqrt{\left(\frac{150^2}{75} + 2 * 1^2 - 1\right)^2 - 4 * (1^2 + 1) * (1^2 - 1)}}{2 * (1^2 + 1)} = 2,5$$

$$c_1 = b * \sqrt{A} * \left(1 + (k - 1) * \left(1 - \left(\frac{1}{\sqrt{A}}\right)^2\right)\right) \quad (2.65)$$

$$c_1 = 75 * \sqrt{2,5} * \left(1 + (1 - 1) * \left(1 - \left(\frac{1}{\sqrt{1}}\right)^2\right)\right) = 118,585 \text{ mm}$$

El mecanizado para el calefactor se realizar en figura mostrada y así también se considera un agujero para conectar el calefactor a la fuente.

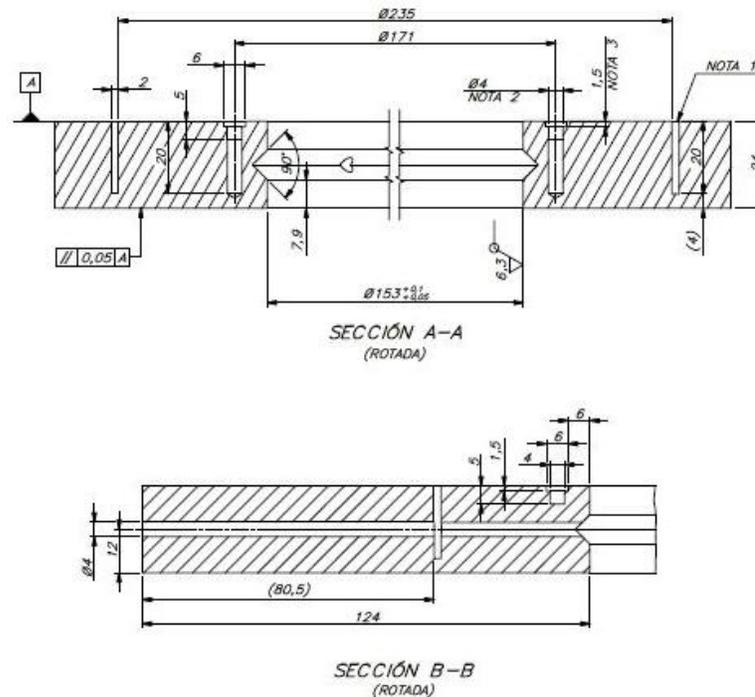


Figura 2. 30 Detalle del mecanizado interno mostrado en el corte A-A (Fuente: Propia)

Finalmente, se muestra los parámetros de diseño final dimensional

Tabla 2.12 Resumen de las dimensiones

Símbolo	Parámetro	Valor (mm)
b	Radio de la placa de medición	75 mm
d	Radio de la placa de guarda	150 mm
a_1	Radio del calentador en la sec. de medición	53,033
c_1	Radio del calentador en la sec. de guarda	118,585

2.7.2.3 Dilatación térmica de la placa de guarda

La placa de guarda contiene la ubicación de los soportes roscados que transmiten su movimiento mediante engranajes que tienen posiciones fijas. Es por ello que se calcula la desviación que originaría el calentamiento de la placa de guarda. A continuación se muestra la expresión para el cálculo de la longitud debido al aumento de temperatura

$$L_f = \sqrt{L_0^2 * (1 + 2 * \alpha_{Alum} * (T_H - T_A))} \quad (2.66)$$

$$L_f = \sqrt{300^2 * (1 + 2 * (23,6 * 10^{-6}) * (65 - 23))} = 300,262 \text{ mm}$$

Por tanto, la variación entre centros del piñón y corona a máxima temperatura de operación viene dado por la siguiente expresión

$$\Delta_{centro} = \sqrt{\left(\frac{L_f - L_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{L_f - L_0}{2}\right)^2} \quad (2.67)$$

$$\Delta_{centro} = \sqrt{\left(\frac{300,262 - 300}{2}\right)^2 + \left(\frac{300,262 - 300}{2}\right)^2} = 0,185 \text{ mm}$$

Sin embargo, esta desviación es teórica ya que las placas frías impiden ese desplazamiento, entonces, lo que se originará será una fuerza radial que deberán soportar las placas frías y soportes roscados.

2.7.3 Placas frías

Las placas frías de 335 mm de lado tienen un mecanizado para permitir la circulación del fluido refrigerante que es el agua. Para realizar el mecanizado se realizara un desbaste en dos placas de aleación de aluminio AA 6003.

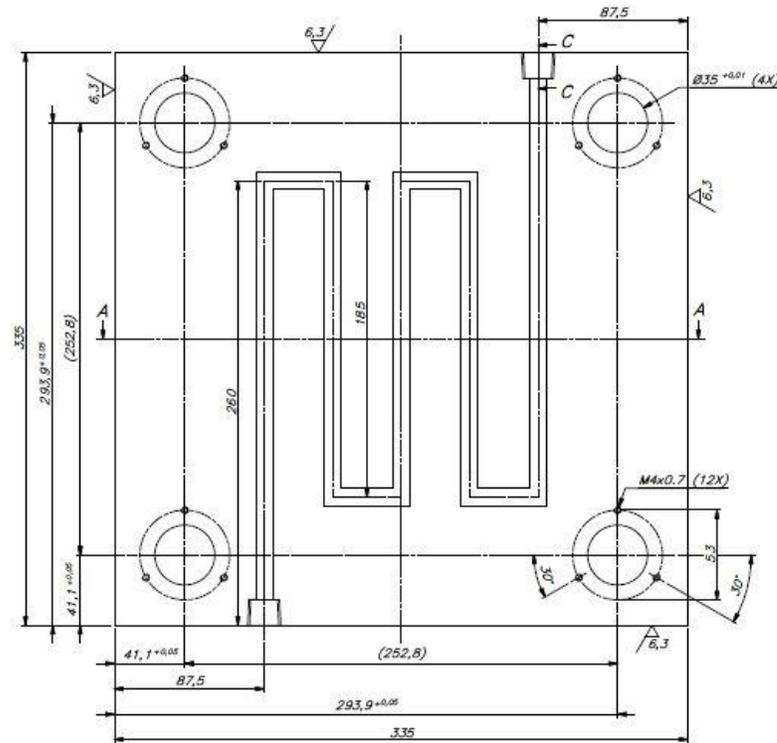


Figura 2. 31 Detalle del mecanizado de la placa fría (Fuente: Propia)

2.7.3.1 Calor transferido por las placas

El calor que se transfieren a los ductos es de carácter bidimensional, y por esta razón se idealiza el modo de transferencia según los apuntes del curso de pregrado de transferencia de calor que puede ser encontrado en los anexos. Se hace uso de la siguiente expresión para determinar el factor de forma y es dependiente de la geometría de los conductos.

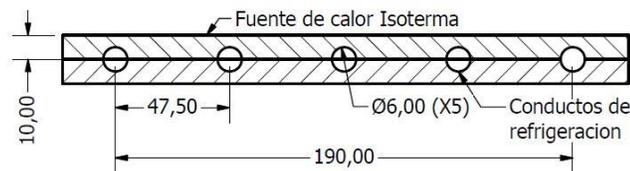


Figura 2. 32 Geometría de los conductos de refrigeración (Fuente: Propia)

$$S_{Alum} = \frac{2 * \pi}{\ln\left(\frac{2 * L_c}{\pi * D_c} * \sinh\left(\frac{2 * \pi * Z_c}{L_c}\right)\right)} \quad (2.68)$$

$$S_{Alum} = \frac{2 * \pi}{\ln\left(\frac{2 * 47,5}{\pi * 10} * \sinh\left(\frac{2 * \pi * 10}{47,5}\right)\right)} = 2,891$$

Luego, el calor por unidad de longitud viene dado por la siguiente expresión y depende de la conductividad térmica, el factor de forma y la variación de temperatura entre la placa caliente y fría que es de 30, pues se sugiere que sea mínimo 20 según la ASTM.

$$q_{Alum} = k_{Alum} * S_{Alum} * (\Delta T_{Alum}) \quad (2.69)$$

$$q_{Alum} = (244 * 10^{-3}) * 2,891 * (30) = 2,116 * 10^4 \frac{W}{m}$$

Entonces, el calor de la superficie hacia los ductos será

$$Q_{Alum} = q_{Alum} * L_{Alum} \quad (2.70)$$

$$Q_{Alum} = (2,116 * 10^4) * 190 = 4,021 * 10^3 W$$

2.7.3.2 Flujo másico de agua requerido

Se usará el agua como refrigerante y se considera que ingresará a temperatura de ambiente. La temperatura de salida dependerá de la temperatura de la fuente, que es la placa caliente y ésta a vez dependerá de la temperatura a la cual se requiere calcular la conductividad térmica de la muestra. Sin embargo, para efectos de cálculo se toma como referencia 60 °C en la placa caliente y se considera una temperatura de salida del fluido en 37°C. Para esta condición, el flujo másico necesario será el que viene dado por la siguiente relación

$$\dot{m}_{H2O} = \frac{Q_{Alum}}{C_{pH2O} * (\Delta T_{H2O})} \quad (2.71)$$

$$\dot{m}_{H2O} = \frac{4,232 * 10^3}{(4,18 * 10^3) * (37 - 23)} = 0,069 \frac{kg}{s}$$

Este valor sirve para tener un valor aproximado del flujo necesario para enfriar las placas, el cual se obtiene de la red de suministro de agua.

2.7.4 Error y aislamiento en la medición de materiales

El error total en la determinación de la conductividad térmica es la suma del error sistemático del dispositivo y los errores aleatorios causados por los efectos no deseados. Sin embargo, si el equipo es construido y operado de acuerdo a la norma el error debería ser cercano al 5%.

2.7.4.1 Error de borde

Cuando se ensayan muestras, el espesor la fuente de error más importante, pues a mayor espesor, se origina un mayor flujo de calor lateral. Este valor es importante en tanto se requiera ensayar muestras de mayor espesor al sugerido por la norma. Las relaciones para evaluar el error debido al espesor se muestran a continuación

$$E_b = A + B * X \quad (2.72)$$

$$X = \frac{T_H + T_C - 2 * T_A}{T_H - T_C} \quad (2.73)$$

Los valores de A y B se obtienen de la figura 2.28 que se muestran a continuación

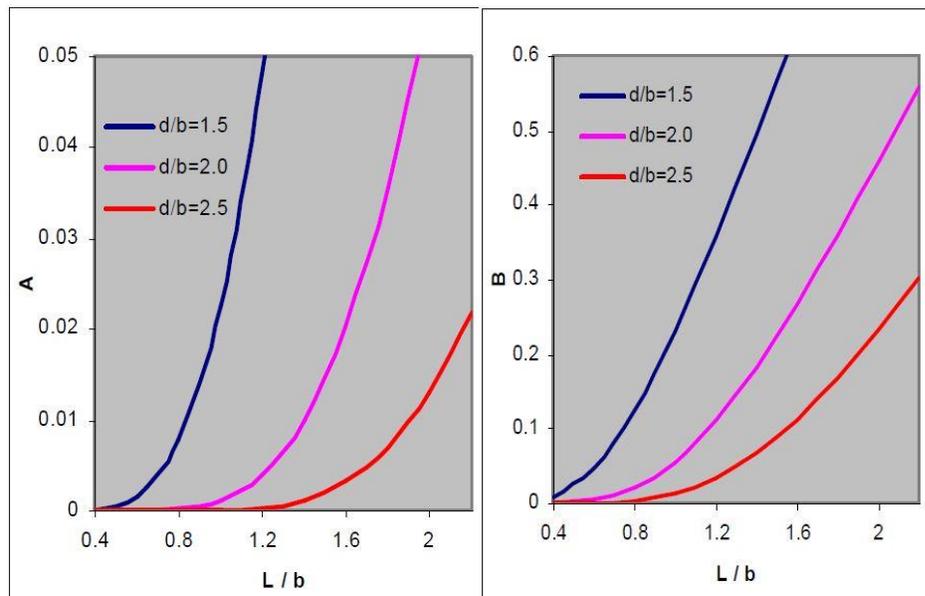


Figura 2. 33 Valores de A y B en función del espesor de la muestra (L), radio exterior de la guarda (d) y radio de medición (b) (Fuente: [14])

La relación d/b y L/b son 2 y 1.6 respectivamente según las dimensiones definidas para la placa caliente y para el cálculo se considera el espesor máximo recomendado de 65 mm. Por otra parte, como se mencionó anteriormente para realizar los cálculos las temperaturas de la placa caliente y fría son 65°C y 35°C respectivamente. Entonces, los valores de las expresiones 2.74 y 2.75 serán los siguientes

$$X = \frac{65 + 35 - 2 * 23}{65 - 35} = 1.467$$

$$E_b = 0,0015 + 0,020 * 1.467 = 3,1\%$$

Con estas expresiones se puede evaluar el error para diferentes rangos de temperatura y otros espesores de muestra.

2.7.4.2 Aislamiento del aparato

La norma ASTM C177 menciona textualmente que el dispositivo debe funcionar en una cámara de ambiente controlado para evitar corrientes de aire. También, se recomienda la cámara de ambiente controlado cuando se vaya a operar el dispositivo a una temperatura hasta 10 grados por encima o debajo de la temperatura de ambiente. En lugar de la cámara

de ambiente controlado es posible colocar un material aislante en tanto cumpla la siguiente relación

$$\frac{T_b - \left(\frac{T_H + T_C}{2}\right)}{T_H - T_C} \leq 0.05 \quad (2.74)$$

Siendo para el caso extremo con T_H a 60°C y T_C a 30°C se observa que la temperatura en el borde de la muestra resulta

$$\frac{T_b - \left(\frac{65 + 35}{2}\right)}{65 - 35} \leq 0.05$$
$$T_b \leq 46,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entonces, T_b debe ser menor o igual que 46,5 °C para la temperatura promedio de T_H y T_C que es 45°C. El valor de T_b se mide de forma experimental colocando un termopar en borde de la muestra, es por ello que, la solución ideal siempre será que el dispositivo funcione en una cámara de ambiente controlado.

2.7 sistema de control

El control se da dos formas, una de ellas por medio de termopares que van formando un arreglo de termopila para medir la variación de temperatura entre la placa de medición y la placa de guarda. La otra alternativa es tomar directamente de la temperatura de la placa de medición y guarda de manera independiente. Sin embargo, los sensores RTD tienen mayor precisión es por ello que se usarán en vez de termopares. Para realizar las múltiples conexiones de las señales de los termopares, resistencias eléctricas, tensión eléctrica, corriente o termopilas a los diferentes instrumentos de medición con una secuencia predeterminada, se utiliza dos controladores de temperatura que contiene una tarjeta de adquisición de datos, un microcontrolador y una fuente. Uno de los controladores de temperatura recibirá la señal de un grupo de sensores RTD colocado en la placa de medición. El otro de los controladores recibirá sus parámetros del grupo restante.

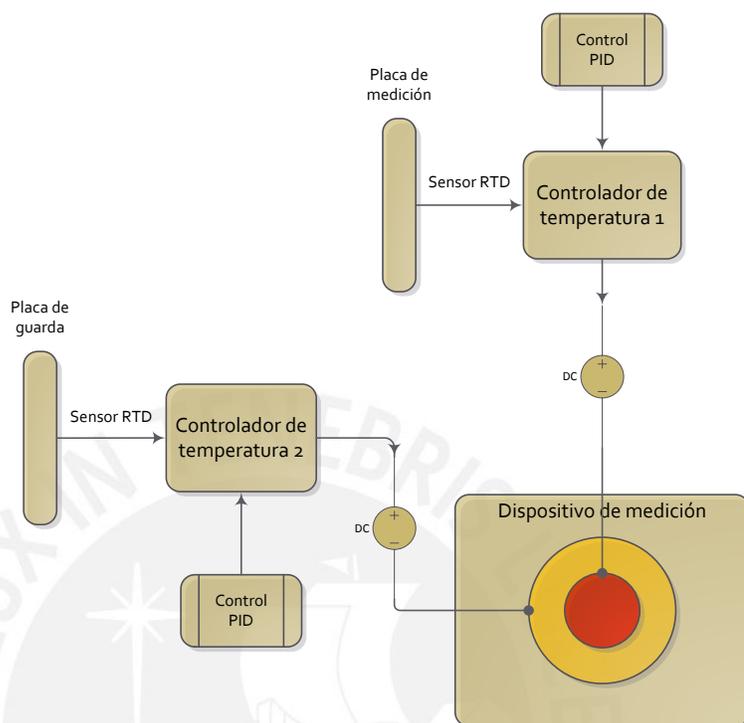


Figura 2. 34 Esquema general de control (Fuente: Propia)

2.8.1 Localización y distribución de los sensores de temperatura

La ubicación de los sensores busca obtener un valor uniforme de la muestra y además verificar que el flujo de calor sea perpendicular al área de medición. Esto se logra realizando la medición en la separación de la placa de medición y placa de guarda en el cual la diferencia mínima. Hahn plantea que en el borde de la placa de medición los sensores se ubican a 111° , 180° y 249° , mientras que, en el borde interno de la placa de guarda se ubican en 47° , 149° , 211° y 313° [15].

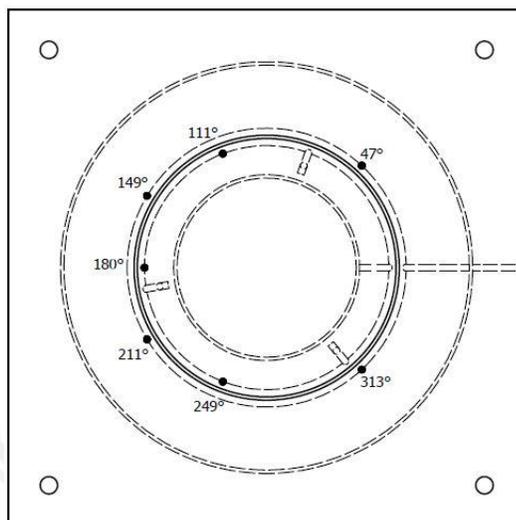


Figura 2. 35 Ubicación de los sensores en la placa caliente (Fuente: Propia)

La temperatura de la placa caliente tiene dos controles independientes. El control mantiene la temperatura de la sección de medición a un valor determinado por el punto de ajuste. Este control tiene tres sensores RTD y está conectado directamente a las terminales del control. Los parámetros de ajuste al control P, I y D (Proporcional, Integral y Derivativo) se determinan realizando pruebas según el método Ziegler-Nichols. La salida del control va a modular en tensión a un controlador de temperatura para que proporcione la potencia requerida en la sección de medición. El criterio para saber que la temperatura es estable se basa en el monitoreo de temperatura en el tiempo de varias corridas cuando se detecta una meseta que indica la estabilidad a largo plazo de la temperatura, es decir la temperatura no deriva a través del tiempo, y sólo se observan variaciones a corto plazo. La estabilidad se caracteriza calculando la desviación estándar de las mediciones en la estabilidad a largo plazo. Es necesario que exista un programa de adquisición de datos y control de instrumentos, allí se compara la desviación estándar de las últimas mediciones con el criterio de estabilidad y se decide continuar el control de temperatura o fijar la potencia.

2.8.2 Caracterización usando el control PID

En esta parte se mostrará cómo responde térmicamente un equipo de placa caliente con guarda frente a un control PID. El Dispositivo también se basa en la norma ASTM C1043, siendo de doble lado de medición y usando calentadores circulares [16]

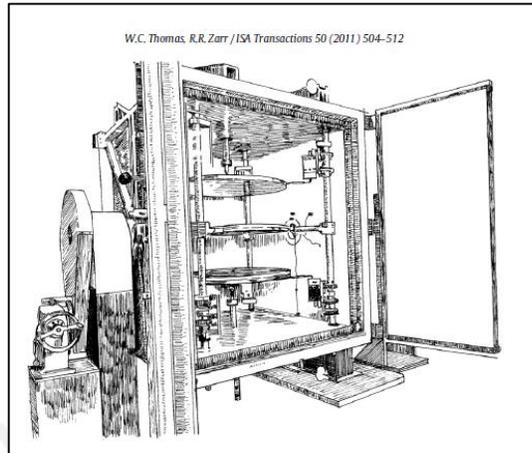


Figura 2. 36 GHPA del NIST (Fuente: [16])

En el documento original se muestran la totalidad de las ecuaciones matemáticas utilizadas para el análisis, sin embargo, lo que se quiere mostrar es el resultado del comportamiento térmico del dispositivo. La aproximación del control PID se utiliza para reducir el tiempo para llegar a la estabilidad del comportamiento de un sistema.

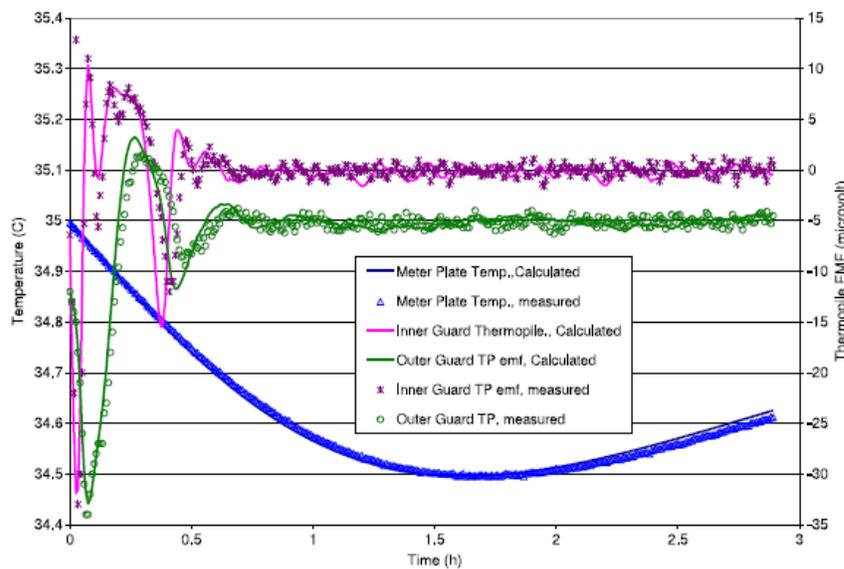


Figura 2. 37 Comportamiento del GHP sin control PID (Fuente: [16])

En la figura 2.37 se ve el comportamiento inicial, es decir, aun no se ha logrado el equilibrio térmico. Esto puede notarse al ver la curva azul, que es aquella que muestra el comportamiento del área de medición del dispositivo, que aún no se ha tornado constante.

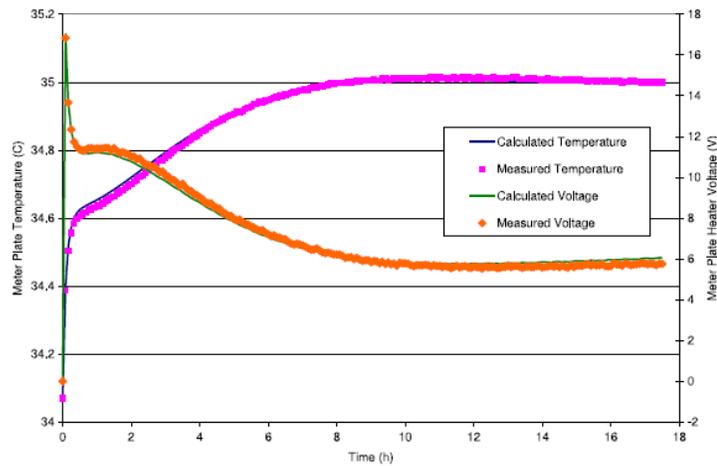


Figura 2. 38 Comportamiento del área de medición y la fuente sin usar control PID (Fuente: [16])

En la figura 2.38 ya podemos apreciar que la estabilización en el área de medición, que es el área crítica, pues allí es donde se tiene que lograr el equilibrio, toma un tiempo considerable, en el rango de las horas, cuya estimación teórica se muestra en el primer capítulo.

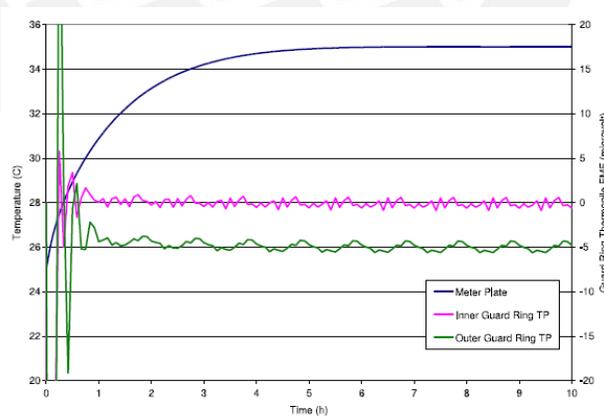


Figura 2. 39 Comportamiento del área de medición usando control PID (Fuente: [16])

En la figura 2.39 se puede observar la respuesta térmica en el área de medición al usar un control PID, como se puede ver el tiempo se ha reducido casi a la mitad, siendo sin control PID alrededor de 8 horas como se puede ver en la figura 2.38 y usando PID el tiempo es de 4 horas aproximadamente.

2.8 El dispositivo final y ensayo de las muestras

El dispositivo para medición de la conductividad térmica según la norma ASTM C1043 luce como se muestra en la figura 2.40. El ensamble del dispositivo considera un montaje mediante cambios de geometrías y elementos de sujeción. La razón es facilitar el desmontaje en caso del desgaste de los elementos y también asegurar la precisión, evitando usar soldadura, dado que producen deformaciones. La colocación de las muestras se realiza girando la volante en sentido horario para aumentar la distancia entre placas y sentido anti horario para realizar la operación inversa. Las muestras deben tener la planitud y homogeneidad explicadas en el primer capítulo, así también, verificar que las superficies de las muestras estén en contacto con las placas y que su superficie cubra el área donde se encuentran los calentadores de guarda.

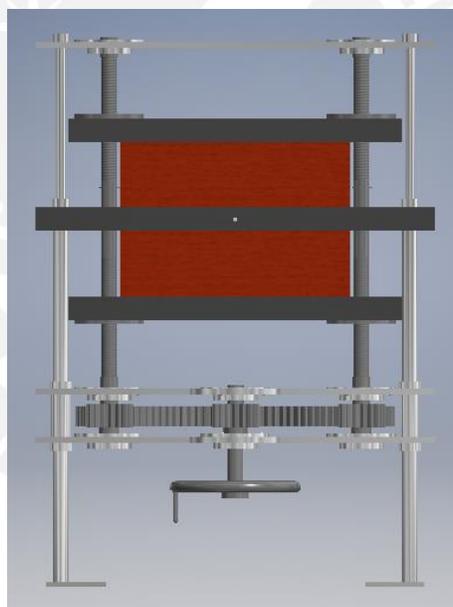


Figura 2. 40 Dispositivo final para la medición de la conductividad térmica

A continuación, se detallan los pasos para realizar el ensayo:

2.8.1 Preparación del dispositivo

1. Limpiar la base y cubierta de las placas con un solvente orgánico para remover impurezas como grasas y polvo.
2. Se inspecciona la pintura de color negro mate de la superficie de la placa de medición y guarda.

3. Se verifica que la placa de medición este correctamente acoplada al interior del anillo de la guarda, igualmente espaciadas.
4. Se debe inspeccionar que las mangueras de la placa de guarda estén en buenas condiciones y no existan fugas de fluido.
5. Se inspeccionan las cintas calentadoras que estén perfectamente recubiertas con mica aislante.
6. Se verifica con un multímetro a la cinta calentadora para comprobar que no existe algún corto circuito entre la resistencia de la cinta y el aluminio de la placa, para evitar algún daño o accidente.
7. Verificar que los cables estén aislados e instalados adecuadamente.
8. Verificar que las fuentes de poder estén conectadas a la red monofásica.
9. Verificar que los sensores RTD estén calibrados y bien posicionados.
10. Inspeccionar el roscado y engrasar si se necesita

2.8.2 Preparación de la muestra

1. Se seleccionan las dos muestras que sean del mismo material
2. Se verifica que las muestras sean iguales en dimensiones, figura y superficies
3. Se debe trabajar sobre las muestras para que las superficies de las caras sean planas.
4. Se inspeccionan que las superficies estén libres del polvo, grasa o alguna impureza que afecte el buen contacto entre las superficies (muestras y placas) y por lo tanto, afecte la medición de la conductividad térmica.
5. Se verifica que el contacto de acoplamiento entre las superficies de las muestras y las placas sea el adecuado.

2.8.3 Realización del ensayo

1. Después de que ya está todo el equipo de medición acoplado, interconectado y funcionando cada una de sus partes se sigue a la realización de la prueba a las muestras para determinar su conductividad térmica aparente.

2. Se verifica que los sensores que registran la temperatura de las placas, de la cámara y de la temperatura ambiente estén monitoreando correctamente en la PC o de forma manual.
3. El intervalo adecuado para la toma de datos es cada 5 minutos hasta que alcance el estado estable para luego reducir el intervalo a 1 minuto. En el estado estable, se inspecciona por un periodo de 30 minutos como mínimo.
4. Se efectúan operaciones correspondientes con los datos de la temperatura registrados, los datos físicos de las muestras (espesor y área de la superficie) y la potencia proporcionada por el voltaje y corriente directa de la fuente de poder a la cual está operando de la placa de medición.
5. Finalmente, se vacían todos los datos en un formato especial que recopila toda la información correspondiente, donde uno de los datos importantes es el valor de la conductividad térmica aparente y el de la resistencia térmica.

Capítulo 3

SELECCION DE COMPONENTES

3.1 Sensores de temperatura

Las termocuplas tipo J se usan principalmente en la industria del plástico y fundición de metales a bajas temperaturas no mayores a los 800°C. La termocupla tipo K se usa típicamente en fundición y hornos a temperaturas menores de los 1300°C, por ejemplo fundición de cobre y hornos de tratados térmicos. Las termocuplas tipo R,S,B se usan casi exclusivamente en la industria siderúrgica. Finalmente, las termocuplas tipo T eran usadas hasta hace algún tiempo en la industria de alimentos, pero han sido desplazadas por los sensores RTD (detector de temperatura resistivo) que su principio basa en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Por lo antes expuesto, para el presente proyecto se usaran sensores de temperatura RTD dado que su aplicación se encuentra desde -100° hasta 200°C. A continuación se muestra un cuadro comparativo tomado del curso de instrumentación de nuestra facultad.

Elemento sensor	Cambo de Aplicación	Precisión	Ventajas	Inconvenientes
T. de vidrio	-196°C a +500°C	1%	Bajo precio, Simplicidad Larga vida	Frágil, Medida local (no control automático ni almacenamiento de valores)
T. de bulbo	-40°C a 425°C	1%	Sin alimentación de energía Compacto	Voluminoso Montaje delicado Medida local
T. bimetalicos	0°C a 500°C	1%	Precio Robustez	Medida local
T. de resistencia de platino	-200°C a +500°C	0.2%	Sensibilidad Precisión Respuesta rápida	Frágil Más caro que el termopar El propio calentamiento
Termistores	0°C a +40°C	0.01%	Gran sensibilidad y precisión Respuesta rápida Pequeño tamaño Estable	No lineal Rango de aplicación limitado
Termopares T Termopares J Termopares K Termopares R o S Termopares W	-200°C a +250°C 0°C a +750°C 0°C a +1.300°C 0°C a +1.600°C 0°C a +2.800°C	2% 0.5% 1% 0.5% 1%	Pequeño tamaño Respuesta rápida Precio razonable	Afectados por corrosión Necesaria compensación de soldadura fría
Pirómetros ópticos	+50°C a +6.000°C	0.5%	No contacto Buena repetibilidad	Elevado precio Difícil determinar Tª exacta
Pirómetros de radiación total	+50°C a +6.000°C	0.5%	No contacto Buena repetibilidad	Elevado precio Difícil determinar Tª exacta Lentitud de respuesta

Figura 3. 1 Cuadro comparativo de instrumentos de medición de temperatura

Como se puede apreciar los termopares de resistencia de platino (PRTD) son los de mayor precisión, es por ello que han sido seleccionados. Para este proyecto se requiere que los elementos sean los más compactos posibles, por lo cual se ha decidido optar con PRTD con el bulbo más pequeño posible y se ha cotizado su fabricación.



Figura 3. 2 Ejemplo de sensor RTD (Fuente: Danfoss)

ITEM 02 : SENSOR PT-100 Ω DE 3 HILOS TIPO PRECABLEADO

SENSOR : De Tres Hilos - Platino 100 Ω . – Adecuado para movimiento y/o Vibración.

COEFICIENTE DE TEMPERATURA : 0.00385 (Ohms/ Ohms/ °C).

GRADO DE PRECISION : CLASE A – NORMA IEC 571.

TEMPERATURA DE SERVICIO MAX. : - 50° C @ 200 ° C.

TEMPERATURA DE USO : 100°C.

BULBO SENSOR : En Acero Inox. AISI 316 – Ø 6 mm. X 16 mm. de Longitud.

PRECABLEADO : Con Cable de Extensión de 3 Hilos, 3 x 24 AWG con doble forro de teflon, longitud 02 mts

MATERIALES : MARCA THERMIBEL – MADE IN COMUNIDAD EUROPEA.

MARCA : JR TEMPCONTROL – PERU.

CANTIDAD : 01 UNIDAD.

PRECIO UNITARIO : S/.- 395.- C/U. MAS IGV (NUEVOS SOLES).

ENTREGA : 05 DIAS UTILES

Figura 3. 3 Ficha técnica del sensor RTD (Fuente: Resistencias JARA)

3.2 Controlador de temperatura

El controlador de temperatura posee bornes para colocar los sensores de temperatura ya sea termopar o RTD. El micro controlador de este elemento interpreta la señal de acuerdo a un programa basado en PID y se comunica con el actuador que es una fuente que también se encuentra implementada dentro de este controlador. El controlador de temperatura seleccionado es de la marca AUTONICS disponible en el mercado peruano. Se ha seleccionado la serie TK debido a su preciso algoritmo PID, la Serie TK realiza un mejor control con un ciclo de muestreo de alta velocidad a 50ms y una precisión de display a 0.3%. Así también, contribuye con el control simultáneo de calefacción o refrigeración, el control automático o manual, la función seleccionable de salida de corriente o salida SSR, la función de salida SSRP y función de comunicación. Finalmente, abarca el apoyo de varios sensores de entrada, Ajuste multi SV, alta resolución de display y tamaño compacto.

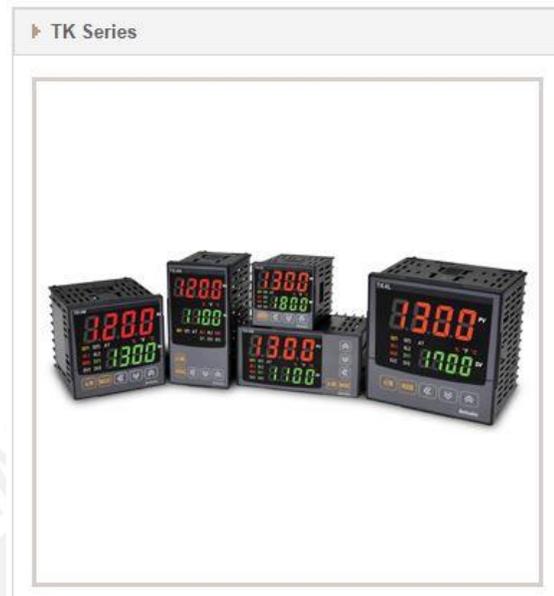


Figura 3. 4 Controlador de temperatura (Fuente: Autronics)

3.3 Fuente DC

Se utilizará una fuente de alimentación regulable de 0 a 5 A y 0 a 32 V de la marca Uni-T modelo UTP 3705S.



Figura 3. 5 Fuente de alimentación DC (Fuente: Uni-T.eu)

3.4 Cinta calefactora

El actuador seleccionado para calentar la superficie de las muestras es un calefactor resistivo lineal, el cual se colocará en forma circular dentro de las placas. Se muestran los calibres disponibles y se selecciona el de mejores propiedades que es el mostrado en el recuadro. El calefactor seleccionado es de marca MIKAI 3/16x0,008 pulgadas.

MEDIDAS			RESISTENCIA	
PULGADAS	MILIMETROS		OHMS/MTO	MTO/KG
1/32 X .003	.80 x .076	MIKAI SA DECV - www.mikai.com.mx - tel. (81) 8374-3217 (81) 8374-1724 Fax. (81) 8374-6021	19.49	2008
1/32 X .007	.80 x .162		13.43	1618
3/64 X .003	1.191 X .076		13.06	1394
3/64 X .004	1.191 X .102		9.81	1080
3/64 X .005	1.191 X .127		7.85	864
3/64 X .007	1.191 X .178		5.43	436
3/64 X .008	1.191 X .203		6.69	337
3/64 X .010	1.191 X .254		4.00	202
1/16 X .003	1.59 X .076		9.80	1041
1/16 X .004	1.59 X .102		7.34	804
1/16 X .005	1.59 X .127		5.87	647
1/16 X .008	1.59 X .152		3.67	404
1/16 X .010	1.59 X .254		2.94	323
3/32 X .003	2.38 X .076		6.55	675
3/32 X .004	2.38 X .102		4.90	540
3/32 X .005	2.38 X .127		3.92	432
3/32 X .006	2.38 X .152		3.11	343
3/32 X .008	2.38 X .203		2.45	270
3/32 X .010	2.38 X .254		1.96	216
1/8 X .003	3.18 X .076		5.02	505
1/8 X .005	3.18 X .127		2.93	317
1/8 X .006	3.18 X .152		2.45	257
1/8 X .007	3.18 X .178		2.09	228
1/8 X .008	3.18 X .203		1.84	202
1/8 X .010	3.18 X .254		1.47	162
1/8 X .015	3.18 X .381		0.94	83
5/32 X .005	3.97 X .127		2.35	260
5/32 X .008	3.97 X .203		1.97	162
5/32 X .010	3.97 X .254	0.68	130	
3/16 X .003	4.76 X .076	3.28	331	
3/16 X .005	4.76 X .127	1.96	198	
3/16 X .008	4.76 X .203	1.10	124	

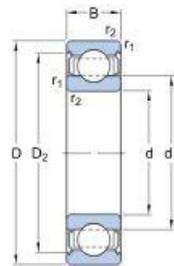
Figura 3. 6 Calentadores lineales (Fuente: MIKAI)

3.5 Rodamientos

Los rodamientos usados en este equipo estarán bajo esfuerzos puramente radiales, puesto que los apoyos tienen un resalte que asegura esta condición. Los rodamientos seleccionados han sido del tipo rígido de bolas, por su alta disponibilidad en el mercado y que su diseño es suficiente para cumplir la función en lugar de otras alternativas más elaboradas, pero con un costo mayor. Los rodamientos seleccionados son de la marca SKF y de dos tipos. El primero con código 6004-2Z como se observa en la ficha técnica debajo es para el apoyo de la corona, el segundo tipo con código 16003-2Z para los apoyos de las barras roscadas. Finalmente, tanto la carga máxima, límite de revoluciones y temperatura de operación de cada modelo son mayores a los requeridos.

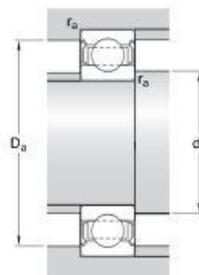
6004-2Z/VA208

Dimensions



d	20	mm
D	42	mm
B	12	mm
d ₁	≈ 27.2	mm
D ₂	≈ 37.19	mm
r _{1,2}	min. 0.6	mm

Abutment dimensions



d _a	min. 23.2	mm
d _a	max. 27.1	mm
D _a	max. 38.8	mm
r _a	max. 0.6	mm

Calculation data

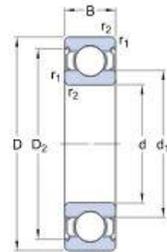
Basic dynamic load rating	C	10	kN
Basic static load rating	C ₀	5	kN
Limiting speed		140	r/min
Limiting temperature	T	350	°C

Figura 3. 7 Rodamiento de bolas 6004-2Z (Fuente: SKF)

16003-2Z

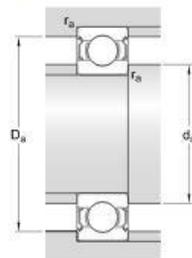
SKF Explorer

Dimensions



d	17	mm
D	35	mm
B	8	mm
d ₁	≡	23 mm
D ₂	≡	31.2 mm
r _{1,2}	min.	0.3 mm

Abutment dimensions



d _a	min.	19	mm
d _a	max.	22.6	mm
D _a	max.	33	mm
r _a	max.	0.3	mm

Calculation data

Basic dynamic load rating	C	6.4	kN
Basic static load rating	C ₀	3.2	kN
Fatigue load limit	P _u	0.137	kN
Reference speed		45000	r/min
Limiting speed		22000	r/min

Figura 3. 8 Rodamiento de bolas 16003-2Z (Fuente: SKF)

3.6 Chavetas

Las chavetas son las encargadas de transmitir la potencia entre elementos que estén dispuestos en sentido axial. Para la selección, se emplearán chavetas según la norma DIN 6885 A. Por otra, parte el material del cubo será el acero, por lo cual su presión de aplastamiento admisible varía de 90 a 100 MPa. Para realizar este cálculo se toma un valor promedio 95 Mpa.

En este cálculo se basa en hallar la longitud mínima efectiva que debe poseer dicha chaveta para asegurar una buena transmisión de potencia y evitar una falla por exceso de la presión de aplastamiento, no se hallarán todas las dimensiones de la chaveta, debido a que estas

ya se encuentran normalizadas. La longitud mínima efectiva se determina mediante la siguiente fórmula

$$L_{ef} = \frac{2 * M_T}{d_{arbol} * p_{adm} * t_{chaveta}} \quad (2.39)$$

Para el diámetro 16 mm correspondiente a donde se colocará la chaveta se tienen valores normalizados según DIN 6885

Tabla 3.1 Extracto de la norma DIN 6885 (Fuente: propia)

12 mm d_{arbol} <math>< 17\text{ mm}</math>		
Ancho de la chaveta ($b_{chaveta}$)	Espesor de la chaveta ($h_{chaveta}$)	Espesor efectivo ($t_{chaveta} = h_{chaveta} - t_{1chaveta}$)
5 mm	5 mm	3 mm

Con estos datos se calcula la longitud mínima efectiva de la chaveta como se muestra

$$L_{ef} = \frac{2 * 0,19}{16 * 95 * 3} = 0,083 \text{ mm}$$

Entonces, la longitud de la chaveta se calcula con la siguiente expresión

$$L_{chaveta} = L_{ef} + b_{chaveta} \quad (2.40)$$

$$L_{chaveta} = 0,086 + 5 = 5,086 \text{ mm}$$

Luego, se elige revisando la norma DIN 6885 se selecciona el valor normalizado superior al encontrado. Se considerado por razones básicamente comerciales elegir una chaveta normalizada de caras paralelas DIN6885 6x6x20.

Capítulo 4

PRESUPUESTO

El presente capítulo tiene como fin la determinación del costo del proyecto. Se divide este capítulo en dos partes donde la primera consiste en organizar los costos realizando el metrado de todos los planos y esquemas. Realizar el metrado quiere decir elaborar un listado de todos los elementos que se comprarán a un tercero o se fabricarán, así como los servicios brindados por terceros. La segunda parte ya se centra en la realización del presupuesto que es el resultado de obtener el costo de lo mencionado en la primera parte.

Entonces, para el presente trabajo se trabajó en conjunto con el área de manufactura de nuestra universidad para poder validar el diseño y el método de manufactura de los distintos elementos mostrados en los planos adjuntos, para poder de esta manera obtener una estimación de costo real. La estimación se realiza estimando el tiempo de fabricación mediante la experiencia del técnico de manufactura, el costo hora-hombre y costo hora-maquina.

4.1 Costo de elementos del sistema de control

Se ha considerado productos disponibles en el mercado local para evitar encarecer el producto y tener la posibilidad de obtener un sustituto rápidamente. El controlador de temperatura es imprescindible si se quiere asegurar la precisión, ya que es necesario el uso del control automático para lograrlo. Los sensores tienen que ser los más precisos, por ello se ha elegido los RTD pese a su mayor costo. El calentador lineal es el actuador para lograr llevar a cabo el ensayo y también son los de mayor desgaste, sin embargo, su costo es mucho menor en comparación a los demás elementos.

Tabla 4.1 Costo total de equipos sistema de control

<i>Item</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unid.</i>	<i>Cant.</i>	<i>Precio Unitario</i> <i>S/.</i>	<i>Costo Parcial</i> <i>S/.</i>
1	Controlador de temperatura	Und	02	178	356.00
2	Sensores RTD	Und	07	335	2,345.00
3	Fuente DC	Und	02	678	1,356.00
4	Calentador lineal	Und	01	46	46.00
Costo total de los elementos del sistema (Sin IGV)					4,103.00
				IGV	738.54
Costo total de los elementos del sistema					4,841.54

4.2 Costo de elementos del sistema de térmico

El sistema térmico se conforma por las placas que permiten realizar el ensayo, la forma se dará con la tecnología llamado corte laser, mientras que, los mecanizados de los ductos serán mediante una fresa. El metrado, validación de la fabricación y posterior cotización para este caso se realizó con la colaboración del personal de laboratorio de manufactura de nuestra universidad.

Tabla 4.2 Costo total de equipos sistema de térmico

<i>Item</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unid.</i>	<i>Cant.</i>	<i>Precio Unitario</i> S/.	<i>Costo Parcial</i> S/.
1	Placa fría	Und	02	568	1,136
2	Placa de medición	Und	01	195	195
3	Placa de guarda	Und	01	462	462
4	tapas	Und	02	38	76
Costo total de los elementos del sistema (Sin IGV)					1,869
				IGV	336.42
Costo total de los elementos del sistema					2,205.42

4.3 Costo de elementos del sistema de mecánico

El sistema mecánico contiene la mayor cantidad de piezas para mecanizar dentro de las cuales se pueden encontrar placas, apoyos, tuercas de traslación, piñones, corona, etc. Por otra parte, otras piezas se comprarán como los rodamientos, prisioneros y anillos. El costo de las piezas mecanizadas se obtiene con el coste horario de hombre-máquina multiplicado por el tiempo de mecanizado. La totalidad de los elementos están detallados en los planos adjuntos en la presente tesis.

Tabla 4.3 Costo total de equipos sistema de mecánico 1

<i>Item</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unid.</i>	<i>Cant.</i>	<i>Precio Unitario</i> S/.	<i>Costo Parcial</i> S/.
1	Eje soporte	Und	04	203	812
2	Placa base	Und	04	100	400
3	Placa soporte inferior	Und	01	284	284
4	collarín	Und	08	49	392
5	Prisioneros M4x5	Und	16	1	16
6	apoyo axial	Und	05	97	485
7	Rodamiento 16003-2Z	Und	14	41	574

Tabla 4.4 Costo total de equipos sistema de mecánico 2

8	Anillo elástico J35x1,3	Und	05	7	35
9	Eje de entrada	Und	01	178	178
10	chavetas 6x6x20	Und	05	11	55
11	Piñón	Und	04	229	916
12	Anillo elástico A17x0,9	Und	05	7	35
13	Prisioneros M4x6	Und	06	1	6
14	Tornillo de traslación	Und	04	356	1424
15	Eje central	Und	01	129	129
16	Rodamiento 6004-2Z	Und	01	56	56
17	Corona	Und	01	610	610
18	Anillo elastico J42x1,6	Und	01	7	7
19	Anillo elastico A20x1,1	Und	01	7	7
20	Placa Soporte intermedia	Und	01	100	100
21	Apoyo radial	Und	09	73	657
22	Tuerca de traslacion inferior	Und	04	165	660
23	Anillo elástico A16x0,9	Und	08	7	56
24	pin de sujecion	Und	03	4	12
25	Collarin 2	Und	04	49	196
26	Tuerca de traslacion superior	Und	04	165	660
27	Placa soporte superior	Und	01	100	100
28	Collarin 3	Und	04	49	196
29	Perno avellanado M4x20	Und	24	1	24
30	Perno avellanado M4x8	Und	45	1	45
Costo total de los elementos del sistema sin IGV (S/.)					8,315
				IGV	1,496.7
Costo total de los elementos del sistema (S/.)					9,811.7

4.4 Costo de elementos del sistema motriz

El sistema motriz es para permitir al usuario manipular el dispositivo, el principio es similar al que se usa en los tornos para realizar el avance manual.

Tabla 4.5 Costo total de equipos sistema de mecánico

<i>Item</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unid.</i>	<i>Cant.</i>	<i>Precio Unitario</i> <i>S/.</i>	<i>Costo Parcial</i> <i>S/.</i>
1	Piñón de entrada	Und	01	183	183
2	Volante	Und	01	64	64
3	Chaveta 6x6x20	Und	01	9	9
Costo total de los elementos del sistema sin IGV (S/.)					256
				IGV	46.08
Costo total de los elementos del sistema (S/.)					302.08

4.5 Costo de diseñador

Se estima con un costo horario de un estudiante, establecido en 8 soles/hora en un horario de normal de trabajo 8 horas de lunes a viernes durante los 4 meses que dura el ciclo académico aproximadamente obteniéndose S/. 5120,00

4.6 Costo total del proyecto

Tabla 4.6 Costo total del proyecto

<i>Item</i>	<i>Descripción</i>	<i>Costo Parcial</i> <i>S/.</i>
1	Sistema de control	4,841.54
2	Sistema térmico	2,205.42
3	Sistema mecánico	9,811.7
4	Sistema motriz	302.08
5	Costo de diseñador	5,120.00
Costo total		22,280.74

4.7 Justificación del presupuesto

En el mercado actual existen dispositivos similares, donde el precio varía debido a varios parámetros como el rango de temperaturas en el que pueden trabajar, el tamaño de las muestras o el grado de automatización que poseen. En el siguiente recuadro tenemos un cuadro con los gastos de comprar un dispositivo similar de china.

Tabla 4.7 Costo de importar de China

Item	Descripción	Costo Parcial
1	Costo FOB	\$12,000.00
2	Gastos de embarcador	\$250.00
3	Handling	\$25.00
4	Agente de Aduana (1% CIF)	\$122.75
5	Ad-Valorem (6% CIF)	\$736.50
6	Transporte local	\$10.00
Costo total		\$13,144.25
Costo total (tipo de cambio:3.2)		S/. 42,061.60

El precio de referencia fue tomado del proveedor chino Alibaba como se observa a continuación:

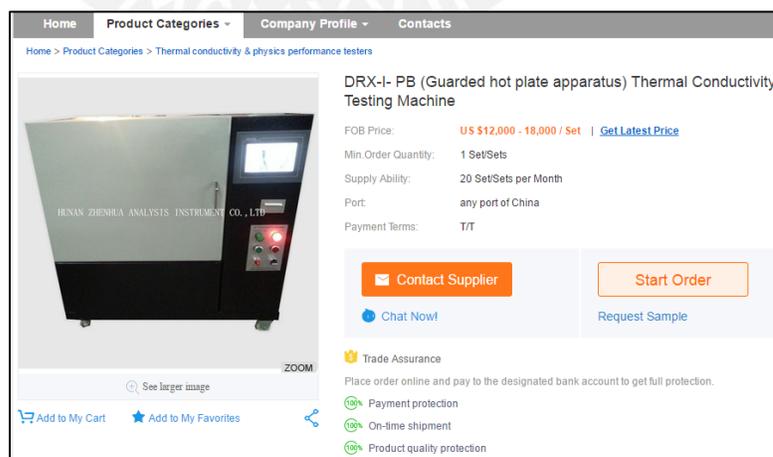
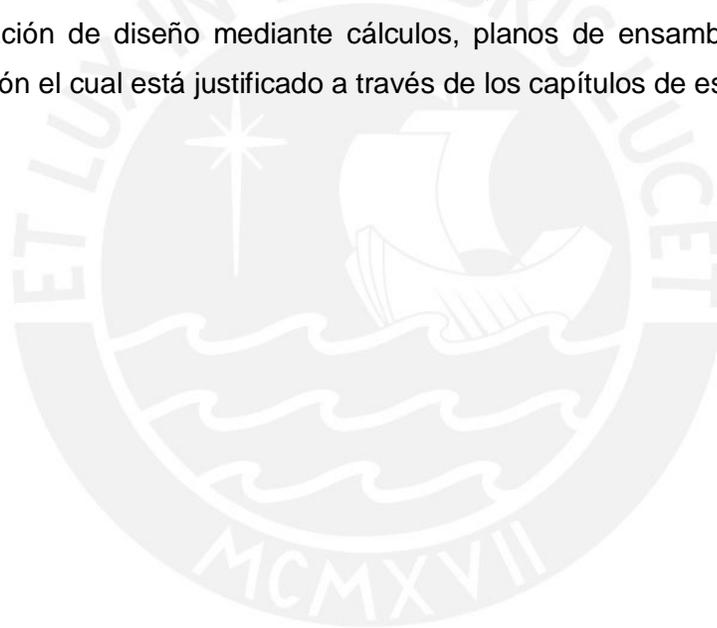


Figura 4.1 Equipo de placa caliente con guarda (Fuente: alibaba.com)

Podemos ver que el precio difiere para este caso en S/. 19,780.86, esta diferencia se da debidos a, factores como la moneda de cambio y también porque estas herramientas poseen un 'knowhow' mayor, es decir, ya ha sido construido y validado de manera experimental, esto implica haber realizado varios prototipos hasta que se logró replicar el diseño de manera real y esto implica un costo mucho mayor al que se ve reflejado en el costo del dispositivo para el presente proyecto de tesis y esto se da normalmente en el desarrollo de equipos en la industria. Para el desarrollo de la presente tesis se abarca el diseño teórico desde el planteamiento del proyecto hasta la obtención de los entregables: la validación de diseño mediante cálculos, planos de ensamble y despiece y costo de fabricación el cual está justificado a través de los capítulos de este trabajo.



CONCLUSIONES

Para finalizar el presente trabajo que se ha venido desarrollando se comentarán las conclusiones de los resultados logrados, el logro de los objetivos planteados en la tesis y su aporte a la normalización de las propiedades térmicas de los materiales de edificación.

1. El presente diseño del dispositivo de medición de conductividad térmica está diseñado para trabajar con la carga de dos muestras de 15 kg. Las dimensiones del dispositivo son 400x400x552 milímetros de largo, ancho y alto respectivamente. El presupuesto está fijado alrededor de 22280 Nuevos Soles, el cual incluye el costo de fabricación de los diferentes elementos o compra de accesorios y el costo de ingeniería de diseño.
2. En la elaboración del presente trabajo se diseñó para dos muestras, ya que con un ensayo simultaneo se optimiza el tiempo y esto es importante considerando que los ensayos se encuentran en el rango de las horas.
3. El método de medición de la conductividad térmica seleccionado se realizó en base a que es un método primario de medición, su alta precisión y la posibilidad de ensayar distintos materiales.
4. Se realizó un análisis de elementos finitos para algunas piezas para obtener resultados más cercanos al comportamiento real. Principalmente a las piezas de geometría compleja, donde el análisis convencional no es práctico para determinar las posibles regiones críticas de la pieza.

5. El diseño en general del dispositivo se subdivide en el sistema mecánico, sistema térmico, sistema de control y sistema motriz. El sistema mecánico abarca el soporte de apoyo, las barras roscadas y sus respectivos accesorios. El sistema térmico contiene a las placas frías, la placa caliente y los accesorios inherentes a estos. El sistema de control abarca toda la instrumentación necesaria: sensores de temperatura, fuentes DC y controladores de temperatura. Por último, el sistema motriz contiene a los piñones, la corona y la volante.
6. El error borde teórico calculado es 3.1% lo cual es acorde a lo que señala la norma ASTM C1043 que menciona que un error menor al 5% es aceptable y esto se da por la distribución mediante calentadores circulares y una placa de medición circular.
7. Para el cálculo de diseño se ha usado el máximo de temperatura recomendado por la norma ASTM C1043 que es hasta 65°C y se ha cumplido con esta condición.

REFERENCIAS

- [1] BASF Construction Chemicals España, Aislamiento Térmico: Confort climático y ahorro energético, España, 2010.
- [2] NOM-018-ENER-1997, Aislantes térmicos para edificaciones, 1997.
- [3] Aldawi, Fayez et al., Applied thermal engineering, 2013.
- [4] CRAterre, Construir con tierra, 1999.
- [5] J. C. Silva, Aspectos térmicos de viviendas en adobe.
- [6] G. Pons, «Características generales de adobe como material,» [En línea]. Available: http://www.ecosur.org/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=43. [Último acceso: 21 enero 2015].
- [7] Ideas para construir, «tipos de ladrillos y sus propiedades,» [En línea]. Available: <C:\Users\hinanzong\Downloads\<http:\ideasparaconstruir.com\n\1541\tipos-de-ladrillos-y-sus-propiedades.html>>. [Último acceso: 21 enero 2015].
- [8] K. S. De Ponte, «Conductivité thermique des isolants,» [En línea]. Available: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/methodes-thermiques-d-analyse-42384210/conductivite-thermique-des-isolants-r2930>. [Último acceso: 30 enero 2015].
- [9] ASTM International, *C177-13: Standard test method for steady-state heat flux measurements thermal transmission properties by means of the guarded hot plate apparatus*, United States: American Society for Testing and Materials, 2013.
- [10] ASTM International, *C1043-06: Standard practice for guarded hot plate design using circular line heat sources*, United States: American Society for Testing and Materials, 2006.
- [11] UNE-EN-12664, Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor, Madrid, España: AENOR, 2002.

- [12] International Standard ISO 8302, Thermal insulation-determination of steady-state thermal resistance and related properties, 1991.
- [13] R. G. Budynas y J. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Mc Graw Hill, 2008.
- [14] L. Lira, S. García, E. Mendez y E. Gonzalez, *Diseño del sistema de medicion de conductividad termica de materiales de construccion*, Queretero, Mexico, 2010.
- [15] M. Hahn, Thermal Insulation, EEUU: American Society for testing materials, 1974.
- [16] Barriga Gamarra, Benjamín, Metodos de diseño en ingeniería mecánica, Lima: PUCP, 2007.
- [17] Ashrae Fundamentals, Chapter 4: Heat transfer, 2009.
- [18] Grupo Cecatherm, Radiación, convección y radiación, 2010.
- [19] C-Term Technologies, [En línea]. Available: http://www.ctherm.com/products/tci_thermal_conductivity/helpful_links_tools/thermal_resistance_thermal_conductance/lang/es/. [Último acceso: 05 enero 2015].
- [20] Transferencia de Calor, [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Transferencia_de_calor. [Último acceso: 05 enero 2015].
- [21] Wikipedia, [En línea]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Convecci%C3%B3n>. [Último acceso: 5 enero 2015].
- [22] Satirnet designers, [En línea]. Available: <http://www.satirnet.com/satirnet/2014/10/23/transmision-propagacion-del-calor-radiacion/#sthash.zAeeC4p5.dpbs>. [Último acceso: 05 enero 2015].
- [23] Netzsch, [En línea]. Available: <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/sp/landing-pages/determinacion-de-la-difusividad-termica-y-de-la-conductividad-termica/definicion-de-conductividad-termica.html>. [Último acceso: 05 enero 2015].
- [24] Technal, Ahorro de energía, 2008.

- [25] Construmática, «Impeabilizacion y aislamiento. Conceptos básicos,» [En línea]. Available: http://www.construmatica.com/construpedia/Impermeabilizaci%C3%B3n_y_Aislamiento._T%C3%A9cnicas_de_Aislamiento_T%C3%A9rmico_y_Ac%C3%BAstico:_Conceptos_B%C3%A1sicos_y_Principios_F%C3%ADsicos. [Último acceso: 05 enero 2015].
- [26] Terra Peru, [En línea]. Available: <http://www.terra.com.pe/buenas-noticias/noticias/acc369/tv-globo-brasil-realiza-documental-sobre-peru.html>. [Último acceso: 21 enero 2015].
- [27] Sodimac, «Ladrillos y casetones,» [En línea]. Available: <http://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/category/cat20040/Ladrillos>. [Último acceso: 2015 enero 21].
- [28] Saber y hacer, «Tipos de ladrillos para construcción,» [En línea]. Available: <http://saberyhacer.com/tipos-de-ladrillos-para-construccion>. [Último acceso: 21 enero 2015].
- [29] Y. A. Cengel, «Transferencia de masa,» de *Transferencia de calor y de masa*, McGraw-Hill Interamericana Editores, 2007, p. 970.
- [30] E. Peclét, *Traité de la chaleur* 4th edition, Paris, Francia, 1878.
- [31] F. Hechler y A. Wood, «Review of methods of testing insulating and building materials for heat transmission,» *The American Institute of Refrigeration*, nº 17, pp. 151-178, 1928.
- [32] R. Zarr, *A history of testing heat insulators at the National Institute of Standards and Technology*, 2001.
- [33] M. Duncan y M. Jarratt, *Thermal conductivity of PTFEE and PTFEE composites*, U.K.: Institute of polymer technology and materials engineering, 2000.
- [34] A. Worthing y D. Halliday, de *Heat*, Nueva York, John Wiley & Sons, 1948, pp. 181-182.
- [35] R. Poensgen, «Ein technisches verfahren sur ermittlung der warmeleitfähigkeit plattenformiger stoffe,» *Zeitschrift des vereines deutscher ingenieure*, nº 56, pp. 1653-1658, 1912.
- [36] R. Cochrane, *Measures for progress: A history of the national bureau of standards*, US: National Bureau of Standards, 1966, p. 130.

- [37] H. Dickinson, *Letter to professor E.B. Penrod at the University of Kentucky*, July 12, 1949.
- [38] 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*, Cuernavaca, México: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico, 2005.
- [39] Instituto nacional de defensa de la competencia y de la protección de la propiedad intelectual, *ITINTEC 331.018*, Lima, Perú: INDECOPI, 1978.
- [40] Norma Argentina IRAM 11601, *Aislamiento térmico de edificios: Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en estado estacionario*, Argentina, 2002.

