

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN PARA MATERIALES NO METÁLICOS PARA EL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

JAVIER EDUARDO BARBA VELÁSQUEZ

javiedubarba@gmail.com

RIGOBERTO FLAVIO TITUANA SÁNCHEZ

rigo_flats@hotmail.com

DIRECTOR: ING. MARIO GRANJA RAMÍREZ

mario.granja@epn.edu.ec

Quito, Julio 2014

DECLARACIÓN

Nosotros, Javier Eduardo Barba Velásquez y Rigoberto Flavio Tituana Sánchez, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Javier Eduardo Barba Velásquez

Rigoberto Flavio Tituana Sánchez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Javier Eduardo Barba Velásquez y Rigoberto Flavio Tituana Sánchez bajo nuestra supervisión.

Ing. Mario Granja

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirnos cumplir esta meta planteada con éxito.

A nuestra familia por ser la base para culminar este reto que nos planteamos en la vida.

A nuestros profesores que han sabido inculcarnos el conocimiento, que han sido guías y amigos a más de catedráticos.

A los compañeros de estudio que han contribuido a hacer de esta institución una gran familia.

A la Escuela Politécnica Nacional y todos la que la conforman, por ser fuente para forjar el futuro de nuestra patria.

A los Ingenieros Mario Granja y Daniel Zapata que han sabido apoyarnos en momentos difíciles para poder sobrellevar este proyecto de manera acertada.

Javier Eduardo Barba Velásquez

Rigoberto Flavio Tituana Sánchez

DEDICATORIA

A mis padres Luis Medardo Barba y Mariana Velásquez porque me han dado el apoyo incondicional en este trayecto en la escuela politécnica nacional y realización de este proyecto, el cual se ha logrado gracias a ellos.

A mis hermanos Cristina, Rubén y Luis quienes han sabido apoyarme en todo este tiempo para poder llegar a culminar con esta meta.

Javier Eduardo Barba Velásquez

A Dios por brindarme la fuerza para lograr este reto y ser la fuente espiritual en mi vida.

A mis padres Lastenia Sánchez y Ángel Tituana porque me han dado el apoyo incondicional en este proyecto de vida y siempre han estado presentes en los momentos de dicha y tristeza.

A mis hermanos Emiliano, Lourdes y Lida, por ser mis amigos y consejeros, y estar siempre junto a mí apoyándome, para sobrellevar con éxito este proyecto.

Rigoberto Flavio Tituana Sánchez

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN	i
CERTIFICACIÓN	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
NOMENCLATURA	xiii
RESUMEN	xv
PRESENTACIÓN.....	xvi
CAPÍTULO I	1
1.1 BASES TEÓRICAS.....	1
1.1.1 TIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	1
1.1.2. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN	1
1.1.2.1 Conducción en estado estable.....	3
1.1.2.2 Conducción en estado transitorio.	3
1.1.3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN	5
1.1.3.1 Convección forzada	5
1.1.3.2 Convección natural o libre.....	5
1.1.4 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN.....	6
1.2 METODOS EXPERIMENTALES PARA LA MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA.....	7
1.2.1 MÉTODOS:	7
a) Método de flujo de calor longitudinal	7
b) Método de calentamiento eléctrico directo	7
c) Método de placa caliente aislada	7
1.3 DESCRIPCION DEL EQUIPO DE ACUERDO AL MÉTODO DE PLACA CALIENTE AISLADA.	8
CAPITULO II	10

DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.....	10
2.1 PLANTEAMIENTO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS	10
2.1.1 CONFIGURACION DEL EQUIPO DE CONDUCCIÓN DE CALOR	10
2.2 MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL ANÁLISIS EN ESTADO ESTABLE.	11
2.2.1 CIRCUITO TÉRMICO PARA LA CONFIGURACION DEL SISTEMA EN ESTADO ESTABLE.	13
2.2.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN	13
2.2.2.1 Pérdidas en el equipo	16
2.2.2.2 Coeficiente convectivo de calor	18
2.2.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MEDICIÓN DEL EQUIPO DE CONDUCCIÓN LINEAL.	19
2.2.4 ESPESOR CRÍTICO DEL AISLANTE	20
2.3 MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL ANÁLISIS EN ESTADO TRANSITORIO.	21
2.3.1 VALIDES DEL MÉTODO DE LA RESISTENCIA INTERNA DESPRECIABLE.....	21
2.3.2 BALANCE ENERGÉTICO EN ESTADO TRANSITORIO	21
2.3.2.1 Balance de energía para la placa caliente de referencia.	22
2.3.2.2 Balance de energía para la muestra.	22
2.3.2.3 Balance de energía para la placa fría de referencia.	22
2.3.3 BALANCE DE ENERGÍA PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONDUCCIÓN TÉRMICA DE LA MUESTRA.....	23
CAPITULO III	24
ANÁLISIS Y CÁLCULO DEL SISTEMA	24
3.1 SELECCIÓN DE MATERIALES	24
3.1.1 SELECCIÓN DEL AISLANTE TÉRMICO.....	24
3.1.2 SELECCIÓN DEL ESPESOR DE LA MUESTRA.....	25

3.1.3 SELECCIÓN DEL CONDUCTOR DE REFERENCIA.	25
3.1.3 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN NATURAL EN ESPACIOS ABIERTOS.....	26
3.2 SIMULACIÓN EN COMSOL DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN EL EQUIPO DE CONDUCCIÓN DE CALOR.....	27
3.3 POTENCIA REQUERIDA.	30
3.3.1 PARÁMETROS Y VARIABLES QUE SE TOMAN EN CUENTA EN LOS MODELOS MATEMÁTICOS EN ESTADO ESTABLE.	30
3.3.1 .2 Área de las probetas de referencia y de la muestra.	31
3.3.1.3 Temperatura en las superficies en contacto probeta-probeta.....	31
3.3.1 .4 Cálculo de la potencia requerida para calentar la superficie de cobre en contacto con la placa calefactora.....	31
3.3.1.5 Propiedades físicas de las probetas. ANEXO C.....	31
3.3.2 RESOLUCIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS EN ESTADO TRANSITORIO.....	32
3.3.2.1 Resolución de la ecuación de calor en estado transitorio.	32
3.3.2.2 Resolución de la ecuación de calor en estado transitorio para la placa caliente.....	34
3.3.2.3 Resolución de la ecuación de calor en estado transitorio para la muestra.....	35
3.3.2.4 Resolución de la ecuación de calor en estado transitorio para la placa fría.....	36
3.3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ESTADO TRANSITORIO.....	38
CAPITULO IV.....	39
CONSTRUCCION DEL EQUIPO.....	39
4.1 PARTES EN LAS QUE SE DIVIDE DEL EQUIPO.	39
4.1.1 CUERPO AISLANTE.....	40
4.1.2 TAPA AISLANTE.....	41

4.1.2.1 Perforaciones roscadas	41
4.1.2.2 Perforaciones sin roscar	41
4.1.3 BASE AISLANTE	41
4.1.3.1 Perforaciones roscadas	42
4.1.4 PLACA CALEFACTORA	43
4.1.5 PLACA CALIENTE Y FRÍA	43
4.1.6 PLACA DE MUESTRA	44
4.1.7 BASE DEL EQUIPO	45
4.1.8 CONTROL ELECTRÓNICO	45
4.2 MONTAJE DEL EQUIPO	46
4.2.1 BASE CARCAZA DE LA RESISTENCIA- RESISTENCIA- TAPA CARCAZA DE LA RESISTENCIA	47
4.2.2 PLACA CALEFACTORA- CUERPO AISLANTE	47
4.2.3 PLACA CALIENTE-MUESTRA-PLACA FRÍA	48
4.2.4 CUERPO AISLANTE Y PLACA CALEFACTORA- PROBETAS- BASE AISLANTE	49
4.2.5 EQUIPO COMPLETO	49
4.3 COSTOS DEL EQUIPO	50
4.3.1 COSTOS DIRECTOS	50
4.3.1.1 Materia prima	50
4.3.1.2 Costos de construcción	51
4.3.1.3 Elementos eléctricos y electrónicos	52
4.3.1.4 Elementos de medición	52
4.3.2 COSTOS INDIRECTOS	52
4.3.3 COSTOS TOTALES	52
CAPÍTULO V	54
PRUEBAS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	54

5.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL EQUIPO DE CONDUCCION DE CALOR EN NO METALES.	54
5.1.1 PRUEBA EXPERIMENTAL EN EL YESO.....	54
5.1.2 GRÁFICOS DE COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS EN ESTADO TRANSITORIO.....	57
5.3 CÁLCULO DEL COEFICIENTE EXPERIMENTAL DE CONDUCCIÓN DE CALOR.	58
5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.	59
CAPÍTULO VI.....	60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
6.1 CONCLUSIONES.	60
6.2 RECOMENDACIONES.....	61
BIBLIOGRAFÍA:	62
ANEXOS	63
ANEXO A: DESCRIPCIÓN DE UNA RESISTENCIA ELECTRICA TUBULAR.....	64
ANEXO B: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL GRILÓN.....	68
ANEXO C: PORPIEDADES TERMOFISICAS DEL COBRE ALUMINIO Y NO METALES.....	70
ANEXO D: EJEMPLO DEL USO DEL COMSOL	84
ANEXO E: EJEMPLO DEL USO DEL WOLFRAM MATEMATICA.	93
ANEXO F: EJEMPLO DEL PROGRAMA LABVIEW	96
ANEXO G: NORMA ASTM C518.2004	100
ANEXO H: PLANOS.....	105
ANEXO I: GUIA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema de configuración del equipo donde se indica los elementos que intercambian calor	9
Figura 2.1: Esquema de la configuración del equipo.....	10
Figura 2.2: Geometría del equipo de conducción.....	12
Figura 2.3: Flujo de calor disipado por el sistema de placas.....	14
Figura 2.4: Cuerpos en contacto perfecto, aislados térmicamente.....	15
Figura 2.5: Temperatura en las superficies en sentido radial.....	17
Figura 2.6: Circuito de resistencias para las pérdidas en sentido radial.....	17
Figura 2.7: Sistema aislado de la muestra y referencias.....	23
Figura 3.1: Vista superior del calor generado en el equipo de conducción de calor	28
Figura 3.2: Vista frontal del calor generado en el equipo de conducción de calor	28
Figura 3.3: Vista inferior del calor generado en el equipo de conducción	29
Figura 3.4: Distribución de temperaturas en cuerpos en contacto sometidos a conducción de calor	30
Figura 3.5: Comportamiento de la temperatura en función del tiempo.....	35
Figura 3.6: Comportamiento de la temperatura en función del tiempo.....	36
Figura 3.7: Comportamiento de la temperatura en función del tiempo.....	37
Figura 4.1: Cuerpo aislante.	40
Figura 4.2: Tapa aislante.....	41
Figura 4.3: Base aislante.....	42
Figura 4.4: Placa calefactora.....	43
Figura 4.5: Placa caliente de cobre.....	43
Figura 4.6: Placa fría.	44
Figura 4.7: Placa muestra.	44
Figura 4.8: Esquema del control electrónico.	46
Figura 4.9: Elementos de la placa calefactora.....	47
Figura 4.10: Montaje de placa calefactora- cuerpo aislante, vista inferior.....	47
Figura 4.11: Montaje de placa calefactora- cuerpo aislante, vista superior.....	48
Figura 4.12: Placa caliente-muestra-placa fría	48
Figura 4.13: Equipo de conducción de calor.	49
Figura 4.14: Equipo completo de conducción de calor por conducción.....	50

Figura 5.1: Resultados experimentales de temperatura vs tiempo.....	56
Figura 5.2: Temperatura vs tiempo de datos experimentales y teóricos en estado transitorio para el cobre caliente.	57
Figura 5.3: Temperatura vs tiempo de datos experimentales y teóricos en estado transitorio para el cobre frío.....	57
Figura 5.4: Temperatura vs tiempo de datos experimentales y teóricos en estado transitorio para la muestra.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Orden de magnitud de la conductividad térmica de gases líquidos y sólidos.	2
Tabla 3.1: Datos de la simulación en COMSOL 4.0, para las probetas.	29
Tabla 3.2: Propiedades físicas de algunos materiales	31
Tabla 3.3: Propiedades físicas de los materiales usados.....	33
Tabla 4.1: Costo de la materia prima	51
Tabla 4.2: Costos de construcción.	51
Tabla 4.3: Costos de materiales eléctricos y electrónicos.	52
Tabla 4.4: Costos totales de producción.	53
Tabla 5.1: Tabla de toma de medidas experimentales.....	54
Tabla5.2:Temperaturas máximas en estado estable.....	58

NOMENCLATURA

A = área normal a la dirección del flujo de calor (m^2)

A_{ab} = superficie de contacto entre los cuerpos “a” y “b”

A_e = área de la superficie emisora (m^2)

Bi : Número adimensional de Biot

C_p = calor específico (KJ/kgk)

$\dot{E}_{s_{ale}}$: Velocidad de pérdida de energía en la superficie (W)

\dot{E}_{alm} : Rapidez de cambio de la energía interna (W)

$(V * \rho * C_p)$ eq= capacitancia total

Gr : Número adimensional de Grashoft

h = coeficiente de convección ($W/m^2.K$)

h_c = coeficiente de convección aire ($W/m^2.K$).

I = intensidad de corriente (Amp)

k = conductividad térmica del material ($W/m.K$)

K_{cu} = coeficiente de conducción térmica de la placa caliente de referencia en ($W/m.K$).

K_M = coeficiente de conducción térmica de la placa de muestra ($W/m.K$).

L_x = espesor de cada probeta (m).

Nu : Número adimensional de Nusselt

Pe = potencia eléctrica (W)

q = flujo de calor (W)

q_k = tasa de transferencia de calor por conducción (W)

q_c = Tasa de transferencia de calor por convección (W)

q_r = rapidez de emisión de energía radiante (W)

q_s = calor entrante al sistema (W).

q_{PA} = calor perdido por conducción a través del aislante y por convección en el ambiente (W)

Q_{ab} = tasa de transferencia de calor interfacial entre cuerpos (W).

R_e = resistencia eléctrica (Ω)

r_A = radio interno (m).

r_B = radio de la capa externa del aislante (m).

ΣR = sumatoria de resistencias térmicas (K/W)

T = temperatura absoluta (K).

T_s = temperatura de la superficie del sólido ($^{\circ}K$)

T_{fluido} = temperatura del fluido ($^{\circ}K$)

ΔT = diferencia de temperatura (K).

T_{interf} = temperatura interfacial (K).

T_a = temperatura en el cuerpo "a" (K).

T_b = temperatura en el cuerpo "b" (K).

$\frac{\partial T}{\partial x}$ = gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor (K/m).

ρ = densidad del material de análisis (Kg/m^3).

μ = velocidad de flujo ($N*s/m^2$)

s = constante de Stefan- Boltzman = $5.66 * 10^{-8} (W/m^2K^4)$

V = volumen del espécimen (m^3).

W = voltaje (V)

RESUMEN

En el presente proyecto se diseña y construye el equipo para el estudio de la transferencia de calor por conducción en materiales no metálicos para el laboratorio de Transferencia de calor.

Para el desarrollo del proyecto se presentan 6 capítulos con la siguiente estructura:

CAPÍTULO 1. Incluye a los fundamentos de transferencia de calor que son utilizados para el desarrollo de los modelos matemáticos, que permiten el diseño del equipo del laboratorio.

CAPÍTULO 2. Comprende el desarrollo de los modelos matemáticos, que permiten hacer el análisis de la transferencia de calor en estado estable y en estado transitorio.

CAPÍTULO 3. Comprende el análisis de los modelos matemáticos, con los valores y parámetros adecuados. Se resuelven las ecuaciones de los modelos matemáticos establecidos en el capítulo 2 con la ayuda del programa Wolfram Matemática 9. Se simula el comportamiento de la transferencia de calor en el programa Comsol 4.0 y se indican los resultados.

CAPÍTULO 4. Se detallan los procesos de fabricación de las partes que conforman del equipo y se muestra las operaciones de acoplamiento de los elementos que conforman el mismo. También constan los costos del equipo.

CAPÍTULO 5. Incluye las tablas de valores de las pruebas experimentales y de los valores teóricos calculados, análisis de los resultados obtenidos por el micro controlador Arduino y de la simulación en el Comsol 4.0, se calculan los errores de los datos obtenidos en cada proceso.

CAPÍTULO 6. Engloba las conclusiones de acuerdo a los objetivos planteados en el proyecto. Detalla las recomendaciones que se hace para el normal desempeño del equipo de laboratorio.

Finalmente se enlista la bibliografía y los anexos correspondientes al proyecto.

PRESENTACIÓN

El proceso de transferencia de calor por conducción en materiales no metálicos es importante analizarlo por su gran uso industrial, el análisis de este fenómeno es con el fin de demostrar que los no metales en su mayoría son excelentes aislantes térmicos.

El proyecto dota de un equipamiento al laboratorio que apoye el estudio de la temática (conductividad térmica) por parte de los estudiantes de Ingeniería Mecánica.

En los laboratorios de Ingeniería Mecánica es necesario estar a la par con la tecnología causa fundamental para renovar los equipos del laboratorio de transferencia de calor, estableciendo un control por medio micro controladores electrónicos y programas simuladores de fenómenos concernientes a nuestra carrera.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 BASES TEÓRICAS

1.1.1 TIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor reconoce tres modos distintos de transmisión de calor: conducción, radiación y convección. Estrictamente hablando, únicamente la conducción y la radiación deberían ser consideradas o clasificadas como procesos de transferencia de calor, porque solamente estos dos mecanismos dependen para su operación, solo de la existencia de una diferencia de temperatura. El último de los tres, la convección, no cumple estrictamente con la definición de transferencia de calor, porque para su operación también depende del transporte de masa. Pero, debido a que en la convección también se efectúa transmisión de energía desde regiones de temperatura más alta a regiones de temperatura más baja, ha sido generalmente aceptado el término de transferencia de calor por convección.¹

1.1.2. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

La conducción es un proceso mediante el cual fluye el calor desde una región de temperatura alta a una región de temperatura baja dentro de un medio (sólido, líquido, gaseosos) o entre medios diferentes en contacto físico directo. En el flujo de calor por conducción, la energía se transmite por comunicación molecular directa sin desplazamiento apreciable de las moléculas. De acuerdo con la teoría cinética, la temperatura de un elemento de materia, es proporcional a la energía cinética media de su constituyente molecular. La energía que posee un elemento de materia debido a la velocidad y a la posición relativa de las moléculas, recibe el nombre de energía interna. Por lo tanto para un elemento dado de materia, mientras más rápidamente se muevan sus moléculas, mayor será su temperatura y su energía interna. Cuando las moléculas de una región adquieren una energía cinética media mayor que la de las moléculas de una región adyacente, lo que se

¹ KREITH F.; 1970; "Principios de transferencia de calor"; Herrero hermanos, sucesores, S.A.; primera edición; México; pag. 4-9

manifiesta por una diferencia de temperatura, las moléculas que poseen mayor energía transmitirán parte de ella a las moléculas de la región a más baja temperatura.

Fourier estableció que la rapidez del flujo de calor por conducción (q_k) en un material, es igual al producto de las siguientes cantidades.

$$q_k = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.1)$$

Donde:

q_k = tasa de transferencia de calor (W)

k = conductividad térmica del material (W/m.K)

A = área normal a la dirección del flujo de calor (m^2)

$\frac{\partial T}{\partial x}$ = gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor.

La conductividad térmica k es una propiedad del material e indica la cantidad de calor que fluirá a través de un área unitaria si el gradiente de temperatura es la unidad. A continuación se muestra la tabla 1.1 en el cual se indica el rango de variación de la conductividad de los materiales en general.

Tabla 1.1 Orden de magnitud de la conductividad térmica de gases líquidos y sólidos.²

MATERIAL	K (Btu/hr pie °F)
Gases a presión atmosférica	0.004 – 0.1
Materiales aislantes	0.02 – 0.12
Líquidos no metálicos	0.05 – 0.4
Sólidos no metálicos	0.02 – 1.5

² Fuente: KREITH F.; 1970; "Principios de transferencia de calor"; Herrero hermanos, sucesores, S.A.; primera edición; México; pag. 10

Metales líquidos	5.0 – 45
Aleaciones	8 – 70
Metales puros	30 – 240

1.1.2.1 Conducción en estado estable.

Se considera la conducción de calor en estado estable, a través de sistemas simples en los que la temperatura y el flujo de calor son funciones de una sola coordenada.

Para el caso de una pared plana, el gradiente de temperatura y el flujo de calor no varían con el tiempo y el área de la sección recta a lo largo de la trayectoria del flujo de calor es uniforme.

Las variables de la ecuación 1.1 pueden separarse y la ecuación resultante es

$$\frac{q_k}{A} \int_0^L dx = - \int_{T_{\text{caliente}}}^{T_{\text{fria}}} k dT \quad (1.2)$$

$\frac{L}{Ak}$ Es la resistencia térmica R_k y el recíproco de la misma es la conductancia térmica K_k .¹

$$q_k = kA \frac{T_{\text{caliente}} - T_{\text{fria}}}{L} = \frac{\Delta T}{\frac{L}{Ak}} = \frac{\Delta T}{R_k} = K_k \Delta T \quad (1.3)$$

1.1.2.2 Conducción en estado transitorio.

Este tipo de sistemas se generan cuando cambian las condiciones de frontera del mismo, por ejemplo al alterarla temperatura superficial, la temperatura en cada punto comenzara a cambiar, los cambios continuaran ocurriendo hasta alcanzar una temperatura de estado estable.

Se debe realizar un análisis en estado transitorio con un equipo de laboratorio, con el fin de poder realizar aproximar los tiempos de estabilización y poder los cálculos.

1.1.2.2.1 Método de la resistencia interna despreciable

El método de la resistencia interna despreciable es la suposición de que la temperatura del sólido es especialmente uniforme en cualquier instante durante el proceso transitorio, esto implica que los gradientes de temperatura dentro del sólido son insignificantes.

De acuerdo con la ley de Fourier, la conducción de calor en ausencia de un gradiente de temperatura implica la existencia de una conductividad térmica infinita, esta condición es claramente imposible, sin embargo, aunque la condición nunca se satisface de forma exacta se acerca mucho a ello si la resistencia a la conducción dentro del sólido es pequeña comparada con la resistencia a la transferencia de calor entre sólidos y sus alrededores.

Al no tomar en cuenta los gradientes de temperatura dentro del sólido, ya no es posible considerar el problema desde dentro del marco de la ecuación de difusión de calor. En su lugar, la respuesta de temperatura transitoria se determina realizando un balance global de energía en el sólido, este balance debe relacionar la velocidad de pérdida de calor en la superficie con la rapidez de cambio de la energía interna.

$$\dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{alm} \quad (1.4)$$

Donde:

\dot{E}_{sale} : Velocidad de pérdida de energía en la superficie

\dot{E}_{alm} : Rapidez de cambio de la energía interna

Para desarrollar un criterio adecuado se considera la conducción en estado estable a través de una pared plana de área A (figura 1.1). Aunque estamos suponiendo condiciones de estado estable, este criterio se extiende fácilmente a los procesos transitorios.

Utilizando este criterio tenemos la ecuación.

$$\frac{kA}{L}(T_{s,1} - T_{s,2}) = hA(T_{s,2} - T_{\infty}) \quad (1.5)$$

Donde k es la conductividad térmica del sólido. Al reacomodar, obtenemos

$$\frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{T_{s,2} - T_{\infty}} = \frac{\frac{L}{kA}}{\frac{1}{hA}} = \frac{R_{conducción}}{R_{convección}} = \frac{hL}{k} \equiv Bi \quad (1.6)$$

La cantidad (hL/k) es un parámetro adimensional y se denomina número de Biot, este desempeña un papel fundamental en problemas de conducción que implican efectos de convección superficial, proporciona una medida de la caída de

temperatura en el sólido en relación con la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido.³

1.1.3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

La convección es un proceso de transporte de energía por acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla. Tiene gran importancia como mecanismo de transferencia de energía entre un sólido y un líquido o un gas.

La transferencia de energía por convección se da:

Primero el calor fluirá por conducción desde la superficie hacia las partículas adyacentes del fluido. Esta energía transferida servirá para incrementar la temperatura y la energía interna de las partículas del fluido, esta energía es almacenada en las partículas del fluido y transportada como resultado del movimiento de masa.

Existen dos tipos de convección: forzada y natural o libre.

1.1.3.1 Convección forzada

Esta ocurre cuando el movimiento de mezclado es inducido por algún agente externo, tal como una bomba o un agitador. En si ocurre cuando el movimiento es inducido por algún tipo de elemento mecánico.

1.1.3.2 Convección natural o libre

Este tipo de convección ocurre cuando el movimiento de mezclado tiene lugar exclusivamente como resultado de la diferencia de densidades causado por los gradientes de temperatura.

La ecuación para determinar la transferencia de calor por convección es:

$$q = h * A * (T_s - T_{\infty}) \quad (1.7)$$

³ INCROPERA F.; 1996; "Fundamentos de transferencia de calor"; Prentice hall; 4ta edición ; México

Donde:

q = Tasa de transferencia de calor por convección (W)

h = coeficiente de convección ($W/m^2.K$)

A = área normal a la dirección del flujo (m^2)

T_s = temperatura de la superficie del sólido ($^{\circ}C$)

T = temperatura del fluido ($^{\circ}C$)

La eficiencia de la transferencia de calor por convección depende básicamente del movimiento de mezclado del fluido, como consecuencia de esto la convección se basa en el conocimiento de las características del flujo del fluido.⁴

1.1.4 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

La radiación es una forma de transferencia de calor la cual no requiere de un medio para su propagación, la radiación es mayor cuando las dos superficies de intercambio de energía están separadas por un vacío perfecto. La forma de transferencia de calor no está muy claro, puede ser respaldado por el argumento ondulatorio como corpuscular, se la puede describir por una expresión analítica sencilla.

La ecuación para determinar la transferencia de calor por radiación está dada por:

$$q = \sigma * A * T^4 \quad (1.8)$$

q = rapidez de emisión de energía radiante (W)

A_e = área de la superficie emisora (m^2)

σ = constante de Stefan- Boltzman = $5.66 * 10^{-8} (W/m^2K^4)$

T = temperatura absoluta.

⁴ KREITH F.; 1970; "Principios de transferencia de calor"; Herrero hermanos, sucesores, S.A.; primera edición; México; pág. 11

1.2 METODOS EXPERIMENTALES PARA LA MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA

1.2.1 MÉTODOS:

a) Método de flujo de calor longitudinal

El arreglo experimental es diseñado para que el flujo de calor sea en la dirección axial de una muestra de barra o disco, la pérdida o ganancia de calor debe ser prevenida y en caso de haberla se debe evaluar, cuando se alcanza el estado estable y si no existen pérdidas o ganancias de calor, la conductividad se determina por la ecuación lineal de Fourier (ecuación 1.1)

b) Método de calentamiento eléctrico directo

La muestra es calentada directamente pasando una corriente eléctrica a través de ella, estos métodos son por lo tanto limitados a mediciones sobre buenos conductores eléctricos. Con este método usualmente se obtiene la conductividad térmica en relación a la conductividad eléctrica.

El calentamiento eléctrico directo tiene ciertas ventajas siendo ellas: permite alcanzar altas temperaturas, usa técnicas experimentales y aparatos más sencillos que otros métodos a altas temperaturas, usa muestras relativamente pequeñas, requiere poco tiempo para alcanzar el equilibrio térmico.

c) Método de placa caliente aislada

La fuente de calor, la muestra y el calor sumergido son puestos en contacto uno con otro, con una placa aislada calentada eléctricamente, las placas térmicas aisladas son mantenidas a una misma temperatura de las superficie adyacente, ya que realmente no ocurre una pérdida significativa de calor de las fuentes hacia el ambiente.

Para medir las diferencias de temperatura de las superficies de la muestra y la energía calórica de entrada que se requiere mantener, se debe determinar la conductividad térmica de la muestra con la ecuación 1.3 despejado k.

$$k = \frac{-q\Delta x}{A\Delta T} \quad (1.9)$$

La desventaja de este método es el tiempo muy prolongado de medición, desde que la conductividad térmica es medida, por lo que la muestra tiene que alcanzar condiciones de estado estable.⁵

1.3 DESCRIPCION DEL EQUIPO DE ACUERDO AL MÉTODO DE PLACA CALIENTE AISLADA.

Se va a diseñar y construir un equipo para determinar la conductividad térmica de los materiales no metálicos.

El equipo que se construirá consiste una placa caliente, calentada por una resistencia eléctrica, como sugiere la norma ASTM C518-2004. ANEXO G.

Se aplica una diferencia de potencial la que es controlada por medio de un circuito electrónico, una placa fría que recibe el flujo calórico del material en para el análisis. La muestra consiste en una probeta circular y se debe ubicar entre ambas placas de tal manera que una de sus caras este en contacto con la placa caliente y la otra con la placa fría.

Todo el conjunto de la placa fuente se encuentra rodeada de un material aislante para evitar la pérdida de calor como se indica en la figura 1.1

⁵ <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/7609/Capitulo3.pdf>

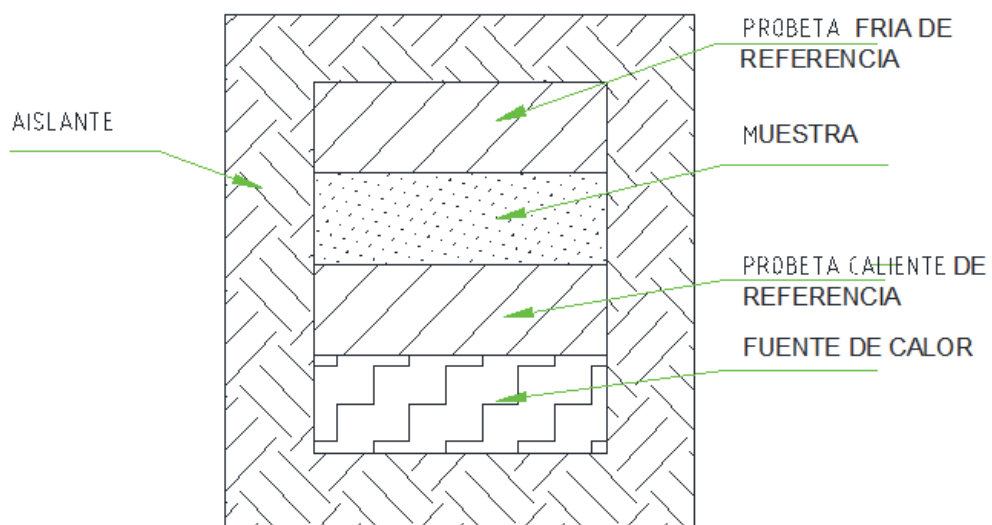


Figura 1.1: Esquema de configuración del equipo donde se indica los elementos que intercambian calor

Fuente propia

CAPITULO II

DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

2.1 PLANTEAMIENTO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Para el análisis de los fenómenos de transferencia de calor por conducción en materiales no metálicos con un flujo suministrado constante se plantean modelos matemáticos. Los mismos se establecen bajo condiciones en estado estable y estado transitorio.

2.1.1 CONFIGURACION DEL EQUIPO DE CONDUCCIÓN DE CALOR

La configuración y geometría del equipo para la determinación de la conductividad térmica en materiales no metálicos se la consigue con una diferencia de temperaturas por medio del calentamiento eléctrico.

Se esquematiza en la figura 2.1, el conjunto de placas que forman el sistema, además se señalan las superficies entre las cuales se intercambia calor por conducción, convección y radiación.

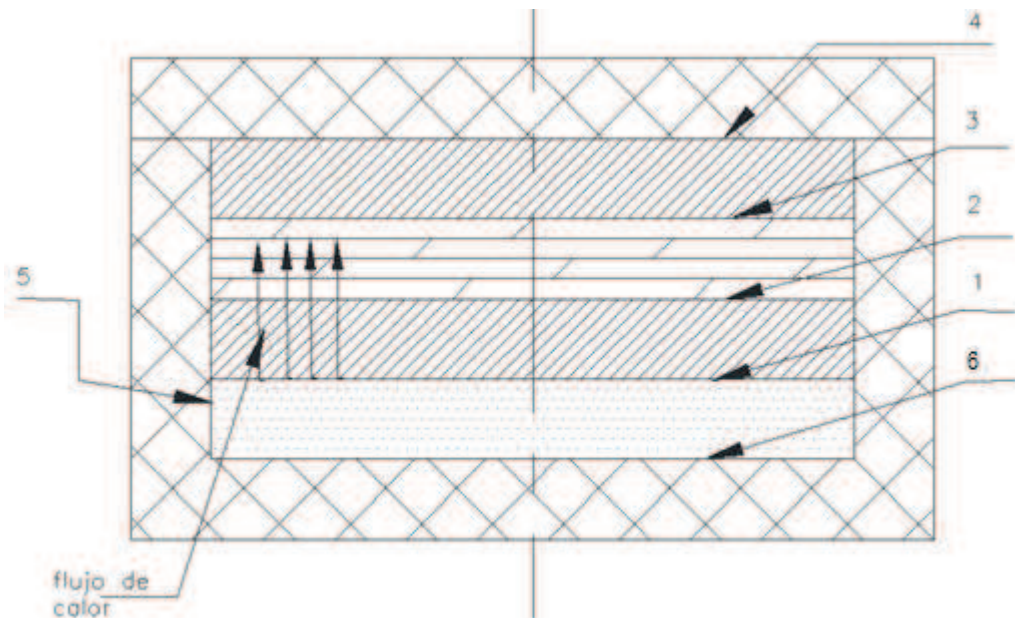


Figura 2.1: Esquema de la configuración del equipo.

Fuente: Propia

- 1: Superficie de contacto entre la resistencia térmica y la placa caliente de referencia.
- 2: Superficie de contacto entre la placa caliente de referencia y la muestra.
- 3: Superficie de contacto entre la muestra y la placa fría de referencia.
- 4: Superficie de contacto entre la placa fría de referencia y la capa aislante.
- 5: superficie interna de la capa aislante.
- 6: Superficie de contacto entre la placa caliente de referencia y la capa aislante.

2.2 MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL ANÁLISIS EN ESTADO ESTABLE.

Con el análisis del sistema en estado estable se logrará encontrar la potencia eléctrica de la resistencia eléctrica calefactora en función del calor que va a ser disipado en las placas del sistema, para lo cual se hacen las siguientes consideraciones:

- El calor que produce la resistencia eléctrica se disipa en las placas de referencia y muestra. La temperatura en la resistencia es uniforme en todo su volumen.
- La conducción es en sentido unidireccional y que las placas están en contacto perfecto.
- Conducción entre la resistencia eléctrica y la placa 1 de referencia.
- Conducción entre la placa 1 de referencia y la muestra de no metal.
- Conducción entre la muestra de no metal y la placa fría de referencia.
- No existe generación interna de energía.
- La conductividad térmica, densidad y calor específico de cada placa se asumen constantes.

El coeficiente de convección se considera constante y semejante en su estado estable.

- La temperatura en las placas o ejes son constantes en un determinado tiempo y solo varían de un tiempo a otro.

- Se considera que el contacto entre las superficies es perfecto (resistencia de contacto despreciable).
- La radiación y convección son despreciables en el interior.
- Hay convección y radiación al exterior casi despreciable desde el aislante.
- La geometría del sistema es la determinada en la figura 2.2

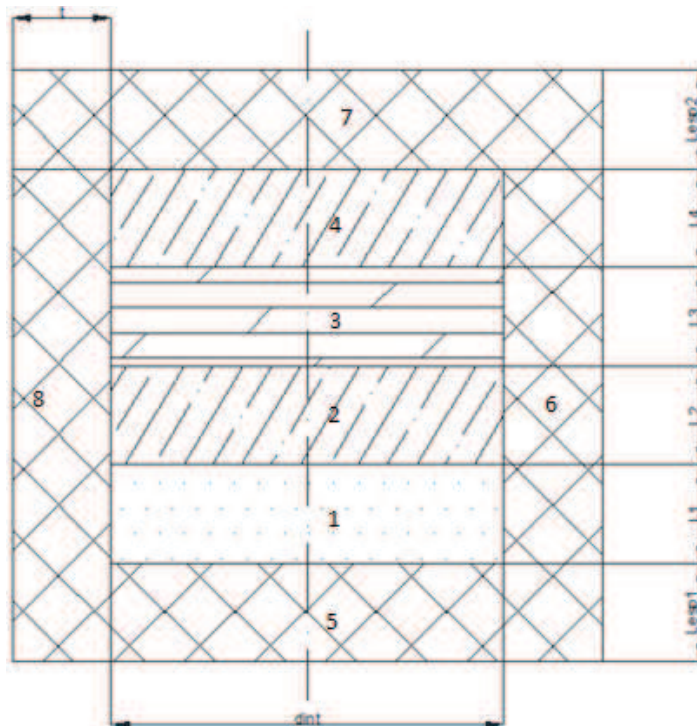


Figura 2.2: Geometría del equipo de conducción

Fuente: propia

Donde:

1: fuente de calor.

2: placa caliente.

3: material a analizar.

4: placa fría.

5, 6, 7 y 8 es el aislante térmico.

2.2.1 CIRCUITO TÉRMICO PARA LA CONFIGURACION DEL SISTEMA EN ESTADO ESTABLE.

2.2.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

“Se puede esquematizar la transferencia de calor por conducción entre diferentes materiales en estado estable utilizando la analogía eléctrica en el cual la variable de impulso es la diferencia de temperaturas y la variable de flujo es el calor.

El flujo de calor se lo puede representar en función de la diferencia de temperaturas y de la resistencia térmica de los materiales, donde el flujo de calor unidimensional se lo representa:”

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_T} \quad (2.1)$$

ΔT = diferencia de temperatura.

$\sum R$ =sumatoria de resistencias térmicas

q = flujo de calor

La potencia eléctrica que se suministra equivale al calor que se intercambia entre las placas, por medio de la conducción unidimensional e igual a la energía potencial eléctrica o diferencia de potencial (voltaje) en voltios por la intensidad de corriente (amperios) que pasa por el sistema.

$$q_s = P_e = WI = \frac{W^2}{R_e} \quad (2.2)$$

Donde:

P_e = potencia eléctrica

q_s = calor entrante al sistema.

W = voltaje

I = intensidad de corriente

⁶ HOLMAN J. P.; 1999;”Transferencia de calor”; CECSA; Décima edición; Mexico; página 43

Re= resistencia eléctrica

Al hacer el balance de energético, considerando idealmente que se el sistema está aislado totalmente se tiene:

$$q_s = q_{keq} = q_{kcu1} = q_m = q_{kcu2} \quad (2.3)$$

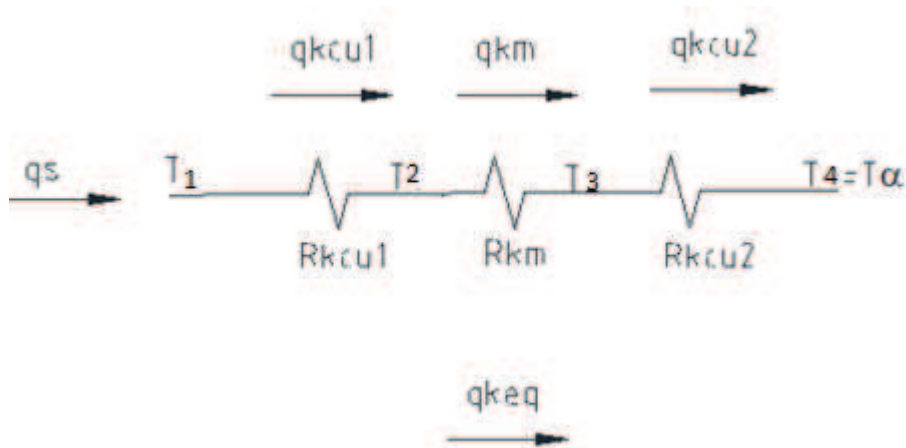


Figura 2.3: Flujo de calor disipado por el sistema de placas.

Fuente: propia

$$q_s = \frac{k_{cu}A*(T_1-T_2)}{L_1} = \frac{k_M A*(T_2-T_3)}{L_2} = \frac{k_{cu}A*(T_3-T_4)}{L_3} = \frac{T_1-T_4}{\frac{L_1}{k_{cu}A} + \frac{L_2}{k_M A} + \frac{L_3}{k_{cu}A}} \quad (2.4)$$

Donde:

K_{cu} = coeficiente de conducción térmica de la placa caliente de referencia en (W/m.K).

K_M = coeficiente de conducción térmica de la placa de muestra (W/m.K).

A= área de contacto entre las probetas, constante para cada superficie (m²).

L_x = espesor de cada probeta (m).

T_x = temperatura en cada superficie (K).

El modelo matemático se va a desarrollar según el sistema de bloques mostrado en la figura 2.4, previo a obtener los balances energéticos en cada bloque (a y b), se desarrollará expresiones para la conducción de calor por conducción entre cuerpos en contactos perfectos y aislados térmicamente.

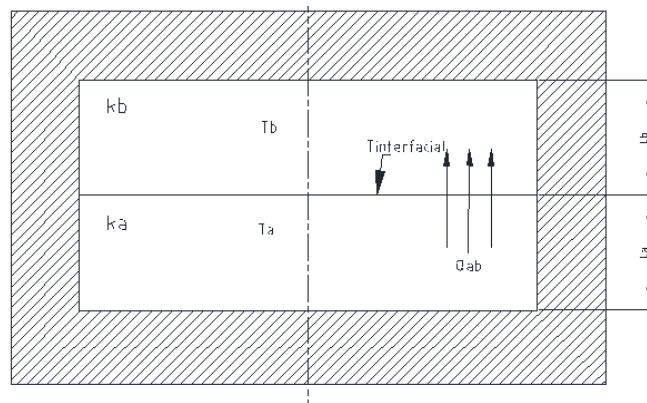


Figura 2.4: Cuerpos en contacto perfecto, aislados térmicamente.

Fuente: propia

La tasa de transferencia de calor interfacial de un cuerpo hacia el otro está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{Q_{ab}}{A_{ab}} = \frac{k_a(T_a - T_{interf})}{L_a} = \frac{k_b(T_{interf} - T_b)}{L_b} \quad (2.5)$$

Donde:

Q_{ab} = tasa de transferencia de calor interfacial entre cuerpos.

A_{ab} = superficie de contacto entre los cuerpos "a" y "b"

K_a = coeficiente de conducción del cuerpo "a"

K_b = coeficiente de conducción del cuerpo "b"

T_{interf} = temperatura interfacial

T_a = temperatura en el cuerpo "a"

T_b = temperatura en el cuerpo "b"

L_a = espesor del cuerpo "a"

L_b = espesor del cuerpo "b"

Despejando la ecuación (2.4) se obtiene que la temperatura interfacial está dada por la siguiente expresión:

$$T_{\text{interf}} = \frac{\frac{k_a T_a + k_b T_b}{L_a + L_b}}{\frac{k_a + k_b}{L_a + L_b}} \quad (2.6)$$

Reemplazando y despejando la ecuación 2.5 en la ecuación 2.3 se tiene que:

$$\frac{Q_{ab}}{A_{ab}} = \left[\frac{\frac{k_a k_b}{L_a L_b}}{\frac{k_a + k_b}{L_a + L_b}} \right] * (T_a - T_b) \quad (2.7)$$

Asignando k_{ab} a la expresión entre corchetes de la ecuación 2.6 se tiene que:

$$k_{ab} = \left[\frac{\frac{k_a k_b}{L_a L_b}}{\frac{k_a + k_b}{L_a + L_b}} \right] \quad (2.8)$$

Entonces la ecuación de calor es:

$$Q_{ab} = A_{ab} * K_{ab} * (T_a - T_b) \quad (2.9)^7$$

2.2.2.1 Pérdidas en el equipo

Las pérdidas en el equipo son pequeñas, cabe destacar que no existen aislantes térmicos perfectos, por tanto se procede a calcular las pérdidas en el equipo, como se indica en la figura 2.5

⁷ INCROPERA F.; 1996; "Fundamentos de transferencia de calor"; Prentice hall; 4ta edición ; México; página 90

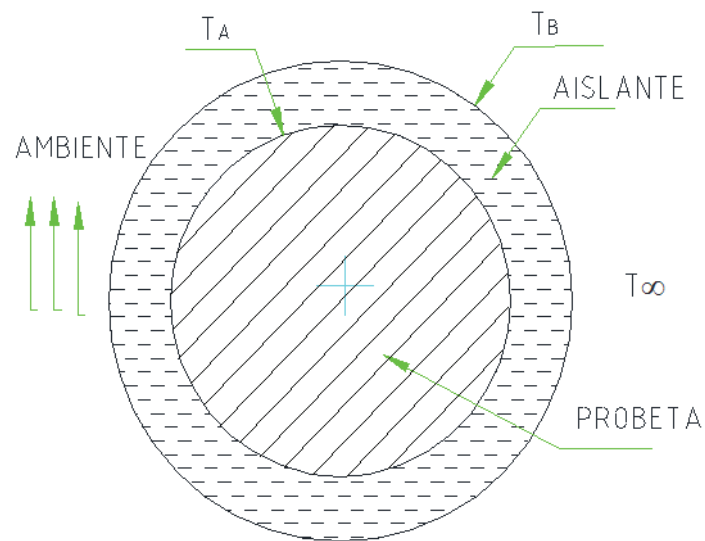


Figura 2.5: Temperatura en las superficies en sentido radial

Fuente: propia

Las pérdidas de calor en el equipo se consideran en sentido radial como se indica en el sistema de resistencias de la figura 2.6

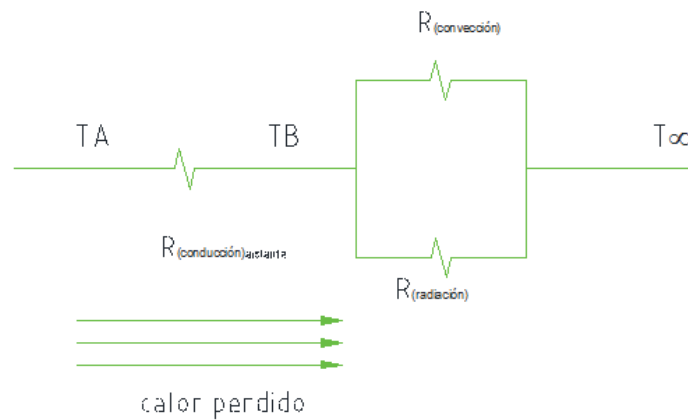


Figura 2.6: Circuito de resistencias para las pérdidas en sentido radial.

Fuente: propia

El calor perdido en el cuerpo A es el mismo que entra en el cuerpo B, entonces haciendo el balance de energía en estado estable se tiene:

$$q_{PA} = q_{cond} + q_{conv} + q_{rad} \quad (2.10)^8$$

Donde:

$$q_{PA} = \frac{(T_A - T_\infty)}{\frac{L_n \left(\frac{r_B}{r_A}\right)}{2 * \pi * L * k_B} + \frac{1}{h_c * L * (2\pi r_B) + h_r * L * (2\pi r_B)}} \quad (2.11)$$

Para el equipo en análisis, la radiación se considera nula porque el aislante casi no emite radiación al ambiente, la convección es muy pequeña por lo que se la desprecia, reduciendo la ecuación 2.11 a la siguiente expresión:

$$q_{PA} = - \frac{(T_A - T_\infty)}{\frac{L_n \left(\frac{r_B}{r_A}\right)}{2 * \pi * L * k_B}} \quad (2.11a)$$

q_{PA} = calor perdido por conducción a través del aislante y por convección en el ambiente(W)

r_A = radio interno (m).

r_B = radio de la capa externa del aislante (m).

k_B = coeficiente de conducción del material en análisis (W/m*K).

h_c = coeficiente de convección aire (W/m²*K).

T_A = temperatura de la superficie de la probeta en análisis (K).

T_∞ = temperatura del ambiente (K).

2.2.2.2 Coeficiente convectivo de calor

Para calcular el coeficiente de convección se considera que la convección es natural el fluido está en reposo, en cilindros verticales

$$Nu = \frac{h * d_{ext}}{k} = C(Gr_{dext}, Pr)^n \quad (2.12)$$

$$Gr_{dext} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (2.13)^9$$

⁸ INCROPERA F.; 1996; "Fundamentos de transferencia de calor"; Prentice hall; 4ta edición ; México; pág.: 28-30

$$\beta = \frac{1}{T_p} = \text{coeficiente de expansión térmica} \quad (2.14)$$

$$T_p = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \text{temperatura absoluta} \quad (2.15)$$

$$Pr = \frac{\rho}{\alpha} = C_p * \frac{\mu}{k} \quad (2.16)$$

Donde:

μ = velocidad de flujo ($N \cdot s/m^2$)

C_p = calor específico (KJ/kgk)

ρ = densidad.

Para superficies verticales, los números de Grashoff (Gr) y Nusselt (Nu) se forman con la altura de la superficie como la dimensión característica. Si el espesor de la capa límite no es grande comparado con el diámetro del cilindro. La transferencia de calor puede calcularse como si se trata de una placa vertical.

$$\frac{D}{L} = \frac{35}{Gr_L^{1/4}} \quad (2.17)$$

La ecuación 2.17 es una representación para flujo de calor constante, las propiedades para estas ecuaciones de evalúan a la temperatura de la película.

$$Nu = 0.68 + \frac{0.670 * Ra^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad \text{para } Ra_L < 10^9 \quad (2.18)$$

$$Nu = 0.825 + \frac{0.387 * Ra^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \quad \text{para } 10^{-1} < Ra_L < 10^{12} \quad (2.19)$$

$$Ra_L = Gr_L * Pr_L \quad (2.20)^{10}$$

2.2.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MEDICIÓN DEL EQUIPO DE CONDUCCIÓN LINEAL.

“Para el análisis de la sensibilidad se debe relacionar la temperatura mínima que puede alcanzar la muestra, con lo que se pudo investigar que hay equipos

⁹ HOLMAN J. P.; 1999; "Transferencia de calor"; CECSA; Décima edición; México; pág.: 301-304

¹⁰ HOLMAN J. P.; 1999; "Transferencia de calor"; CECSA; Décima edición; México; páginas 308-309

RTD(Resistive Temperature Detector) que tienen una sensibilidad de hasta 0,1 °C y muy estables en el tiempo”.¹¹

Se procede a usar la Ley de Fourier para el cálculo del largo mínimo de la muestra.

$$Q_m = -\frac{k_{ref} * A_m * \Delta T_{min}}{L_{min}} = Q_1 \quad (2.21)$$

Por lo tanto:

$$L_{min} = -\frac{k_{ref} * A_m * \Delta T_{min}}{Q_1} \quad (2.22)$$

Cabe destacar que el espesor mínimo debe ser menos o igual que el espesor de la muestra.

Despejando k de la ecuación 2.20 se obtiene la conductividad térmica mínima.

$$k_{min} = -\frac{L_{min} * Q_1}{A_m * \Delta T_{min}} \quad (2.23)$$

2.2.4 ESPESOR CRÍTICO DEL AISLANTE

Una capa de aislante que se podría ubicarse alrededor de un eje tiene una transferencia de calor de:

$$q = \frac{2\pi L(T_i - T_\infty)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \frac{1}{k} + \frac{1}{r_o h}} \quad (2.24)$$

Al derivar la transferencia de calor en función del radio crítico, siendo el calor constante se tiene:

$$\frac{dq}{dr_o} = 0 = \frac{-2\pi L(T_i - T_\infty) * \left(\frac{1}{kr_o} - \frac{1}{hr_o^2}\right)}{\left[\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \frac{1}{k} + \frac{1}{r_o h}\right]^2} \quad (2.25)$$

Al despejar el radio crítico r_o se obtiene:

$$r_o = \frac{k_{material}}{h_{ambiente}} \quad (2.26)$$

¹¹ (<http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/588-sensores-de-temperatura-rtd>)

2.3 MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL ANÁLISIS EN ESTADO TRANSITORIO.

Hay que calcular el tiempo de estabilización en las prácticas de laboratorio de conducción térmica, para lo cual se realiza el balance energético en estado transitorio con variación de la temperatura en función del tiempo.

Se supone que la existencia de los gradientes de temperatura dentro de los sólidos en conducción son insignificantes, para facilitar los cálculos se usa el método de resistencia interna despreciable.

2.3.1 VALIDES DEL MÉTODO DE LA RESISTENCIA INTERNA DESPRECIABLE.

Se toman las siguientes consideraciones para el análisis del balance energético en estado transitorio:

- La temperatura en cada punto de las muestras será la misma para cada instante de tiempo hasta que se llegue al estado estable.
- La generación interna de energía es despreciable.
- El material de las placas de referencia y de la resistencia eléctrica que suministra el calor al sistema son de alta conductividad térmica de tal manera que el gradiente de temperaturas en el sólido es despreciable.
- Se considera que el aislante emite una radiación despreciable al ambiente.
- Las probetas están cubiertas por un material aislante de baja conducción térmica, lo que implica que las pérdidas son muy pequeñas.
- Se considera que la convección alrededor del equipo es muy pequeña.
- La temperatura en los alrededores del aislante es constante y similar a la temperatura ambiente.
- El calor que ingresa al sistema es a través de una resistencia eléctrica (potencia eléctrica).

2.3.2 BALANCE ENERGÉTICO EN ESTADO TRANSITORIO

Para el modelo transitorio se parte de la ecuación 1.4

$$\dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{alm}$$

La energía que entra al sistema es la potencia eléctrica, la energía que sale es el calor disipado por conducción y convección, la radiación es despreciable, la energía almacenada es la producida por el cambio de temperaturas en función del tiempo, por lo tanto la ecuación de intercambio de energía queda:

$$q_{entra} - q_k - q_c - q_{PA} = \rho * V * C_{p*eq} \frac{dT}{dt} \quad (2.27)$$

$(V * \rho * C_p)_{eq}$ = capacitancia total

V = volumen del espécimen.

ρ = densidad del material de análisis.

C_p = capacidad calorífica.

2.3.2.1 Balance de energía para la placa caliente de referencia.

Se procede a resolver las ecuaciones por el método de resistencia interna despreciable.

Por la ecuación 2.4 en 2.11a se obtiene:

$$A_x = \pi r_x^2 \quad (2.28)$$

$$P_e - \frac{k_{cu} A * (T_2 - T_1)}{L_1} + \frac{(T_2 - T_\infty)}{\frac{L_n \left(\frac{r_{aisl}}{r_m} \right)}{2 * \pi * L * k_{aisl}}} = \rho_{cu} V_{cu} C_{p_{cu}} \frac{dT_2}{dt} \quad (2.29)$$

Donde al ordenar se tiene:

$$\rho_{cu} V_{cu} C_{p_{cu}} \frac{dT_2}{dt} = P_e - \frac{k_{cu} A * (T_2 - T_1)}{L_1} - \frac{(T_2 - T_\infty)}{\frac{L_n \left(\frac{r_{aisl}}{r_m} \right)}{2 * \pi * L * k_{aisl}}} \quad (2.30)$$

2.3.2.2 Balance de energía para la muestra.

Por la ecuación 2.4 en 2.11a se obtiene:

$$\rho_m V_m C_{p_m} \frac{dT_3}{dt} = \frac{k_{cu} A * (T_2 - T_1)}{L_1} - \frac{k_m A * (T_3 - T_2)}{L_2} - \frac{(T_3 - T_\infty)}{\frac{L_n \left(\frac{r_{aisl}}{r_2} \right)}{2 * \pi * L_2 * k_{aisl}}} \quad (2.31)$$

2.3.2.3 Balance de energía para la placa fría de referencia.

Por la ecuación 2.4 en 2.11a se obtiene:

$$\rho_{cu} V_{cu} C_{cu} \frac{dT_4}{dt} = \frac{k_m A (T_3 - T_2)}{L_2} - \frac{k_m A (T_4 - T_3)}{L_3} - \frac{(T_4 - T_\infty)}{\frac{L_n (r_{aisl})}{2 * \pi * L_3 * k_{aisl}}} \quad (2.32)$$

2.3.3 BALANCE DE ENERGÍA PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONDUCCIÓN TÉRMICA DE LA MUESTRA.

Se considera un sistema aislado en el cual está el elemento de muestra y los elementos de referencia, como se puede apreciar en la figura 2.7

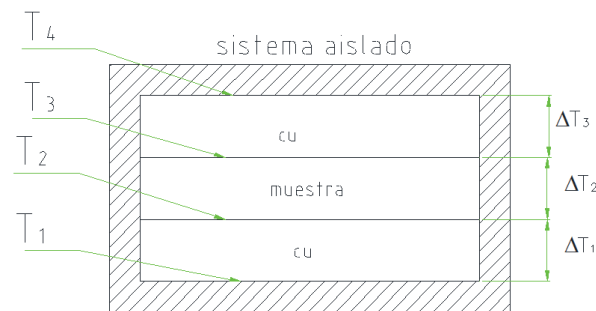


Figura 2.7: Sistema aislado de la muestra y referencias

Fuente: propia.

Al hacer el balance de energía para los elementos que están en conducción se tiene el coeficiente de conducción de calor de la muestra en función de coeficiente de conducción de calor de referencia y de la variación de temperaturas en cada bloque. Las áreas de contacto se consideran iguales, las cuales se las suprime. Coeficiente de conducción de la referencia y de los espesores se los considera constantes:

$$q_1 = q_2 = q_3 \quad (2.33)$$

Al reemplazar la ecuación 2.34 en función de la temperatura se logra:

$$P_e = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_1}{k_{cu} A} + \frac{L_2}{k_M A} + \frac{L_3}{k_{cu} A}} \quad (2.34)$$

Los espesores de las probetas son iguales ($L_1=L_2=L_3$), al igual que el área. Se supone constante la constante de la placa de referencia.

Despejando k_m de la ecuación 2.34 se obtiene:

$$k_m = \frac{P_e * L_2 * k_{cu}}{k_{cu} * A * \Delta T_2 - 2P * L} \quad (2.35)$$

CAPITULO III

ANÁLISIS Y CÁLCULO DEL SISTEMA

3.1 SELECCIÓN DE MATERIALES

Para la resolución de los modelos matemáticos hay que determinar los materiales que se van a usar, hay que tener en cuenta las propiedades como coeficiente de conductividad térmica, coeficiente de convección natural, densidad y capacidad calorífica.

3.1.1 SELECCIÓN DEL AISLANTE TÉRMICO

La consideración principal para seleccionar el aislante térmico es de tener bajo coeficiente de conductividad térmica, por lo que se hizo varios análisis de materiales tales como: duralón, grilón, perlita expandida, cemento refractario, etc.

El aislante térmico debe cumplir además de las consideraciones anteriores debe cumple otras especificaciones tales como:

- Absorción de humedad nula.
- Buen aislante eléctrico.
- Dimensión estable.
- Facilidad de construcción o moldeado.
- Resistencia a la compresión.
- Resistencia química excelente.
- Buena resistencia al desgaste.

Debido a que se usa temperaturas bajas para el análisis de los materiales no metálicos, se elige el grilón como aislante térmico, cumpliendo todos los requisitos de diseño.

El grilón es un elemento termoplástico obtenido a partir de la Poliamida 6, que difiere de los plásticos de uso corriente por sus excelentes propiedades

mecánicas, eléctricas, térmicas, químicas.¹² Tiene un coeficiente de conductividad térmica de 0,2 kcal/mh°C = 0,23 W/mK a 20 °C (ANEXO B)

3.1.2 SELECCIÓN DEL ESPESOR DE LA MUESTRA.

Se resuelve la ecuación 2.22, teniendo en cuenta que para análisis de la muestra de referencia, se toma el mayor valor del coeficiente de conductividad térmica del elemento no metal a temperatura ambiente.

- Coeficiente de conductividad del óxido de aluminio, $K_{ref}=36 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ a 300°K ¹³.
- Área en contacto= $0,0062\text{m}^2$.
- Temperatura ambiental promedio= $20^{\circ}\text{C}=293^{\circ}\text{K}$
- Diferencia de temperaturas en la probeta = $0,1^{\circ}\text{K}$.
- Potencia máxima que puede generar la resistencia eléctrica = 6 W

$$L_{\min} = \frac{36 * 0,0062 * 0,1}{6}$$

$$L_{\min} = 0,0037 \approx 0,004 \text{ m}$$

El espesor mínimo es de 0,004 metros, por lo tanto se selecciona un espesor de 0,01 metros por facilidad de construcción.

3.1.3 SELECCIÓN DEL CONDUCTOR DE REFERENCIA.

El conductor de referencia debe tener:

- Conductividad térmica muy alta a temperatura ambiente.
- Debe tener facilidad de maquinado.

¹²

<http://www.nth.com.ar/panel/Web/Upload/ProductDocument/f9f20a15fed0008ba3a26677fe7d6e50.pdf>

¹³ INCROPERA F.; 1996; "Fundamentos de transferencia de calor"; Prentice hall; 4ta edición; México; página 832.

- Excelente resistencia a la corrosión y compresión.
- Debe ser un excelente conductor eléctrico.
- Su dimensión debe ser estable.

Se hizo el análisis de los mejores materiales conductores térmicos como son los casos de cobre, aluminio, bronce.

El material seleccionado es el cobre por sus mejores propiedades físicas respecto a los demás. Tiene un coeficiente de conducción térmica de 401 (W/m.K) a 300°K¹⁴. El cual permite elevar la temperatura a mayores grados térmicos, puesto la mayoría de los no metales resisten altas temperaturas y se comportan como aislantes.

3.1.3 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN NATURAL EN ESPACIOS ABIERTOS.

Se calcula el coeficiente de expansión térmica de la ecuación 2.13 asumiendo que la temperatura en la superficie externa es de 300 °K y que la temperatura ambiental es 293°K.

$$\beta = \frac{1}{296,5} = 0,0034 \left[\frac{1}{K} \right]$$

Propiedades del aire a 296°K resultado de la interpolación respectiva de la tabla A.4¹⁵

ρ = densidad=1,3777 (kg/m³)

ν = viscosidad cinemática=13,506x10⁻⁶ (m²/s)

K = conductividad térmica=25,255 x10⁻³ (W/mK)

Pr =número adimensional de Prandtl=0,7079

g = aceleración de la gravedad=9.8 m/s²

L = longitud característica= Volumen /área =diámetro externo

¹⁴ INCROPERA F.; 1996;"Fundamentos de transferencia de calor"; Prentice hall; 4ta edición; México; página 828.

¹⁵ INCROPERA F.; 1996;"Fundamentos de transferencia de calor"; Prentice hall; 4ta edición; México; página 839.

Se procede al cálculo del número de Grashoff con la ecuación 2.13, se obtiene el siguiente valor:

$$Gr_{dext} = 4315422,5$$

Por lo tanto el número de Rayleigh= $Ra = Pr * Gr = 3054887,6 < 10^9$ 638104

La ecuación 2.18 es la adecuada para calcular el número adimensional de Nusselt= Nu. Dando como resultado:

$$Nu = 21,5$$

Se calcula el coeficiente de convección con la ecuación 2.12

Obteniendo el coeficiente de convección h

$$h = 3,62 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

3.2 SIMULACIÓN EN COMSOL DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN EL EQUIPO DE CONDUCCIÓN DE CALOR.

El programa COMSOL 4.0 es una herramienta para modelar y simular elementos sometidos a calor, el mismo que es basado en los elementos finitos.

En la simulación realizada en este programa se puede observar el comportamiento de los cuerpos sometidos a una temperatura dispuesta por una fuente de calor.

3.2.1 SIMULACIÓN Y OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE TEMPERATURA EN LA SECCION PARALELA A LA DIRECCIÓN DEL CALOR DE ENTRADA.

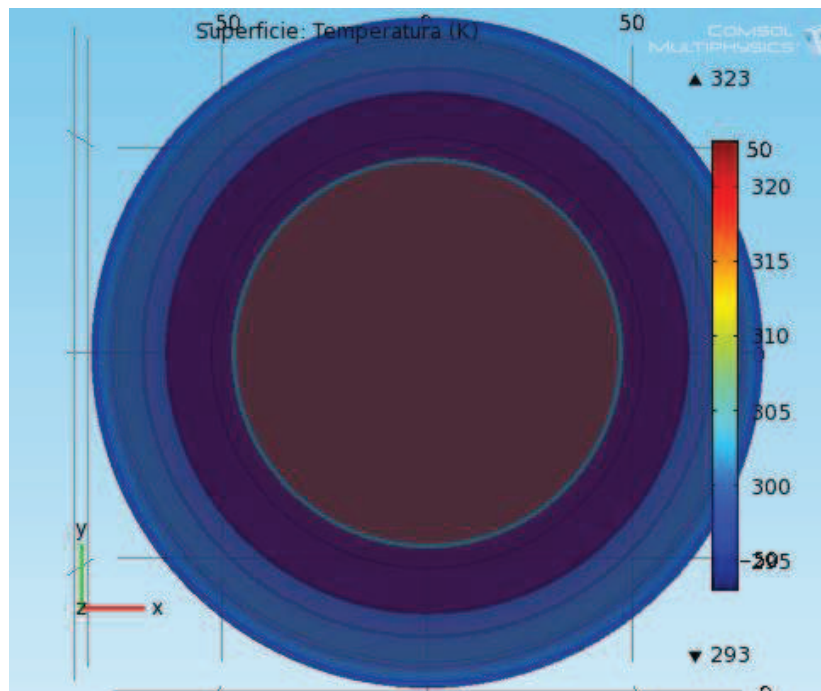


Figura 3.1: Vista superior del calor generado en el equipo de conducción de calor

Fuente: propia.

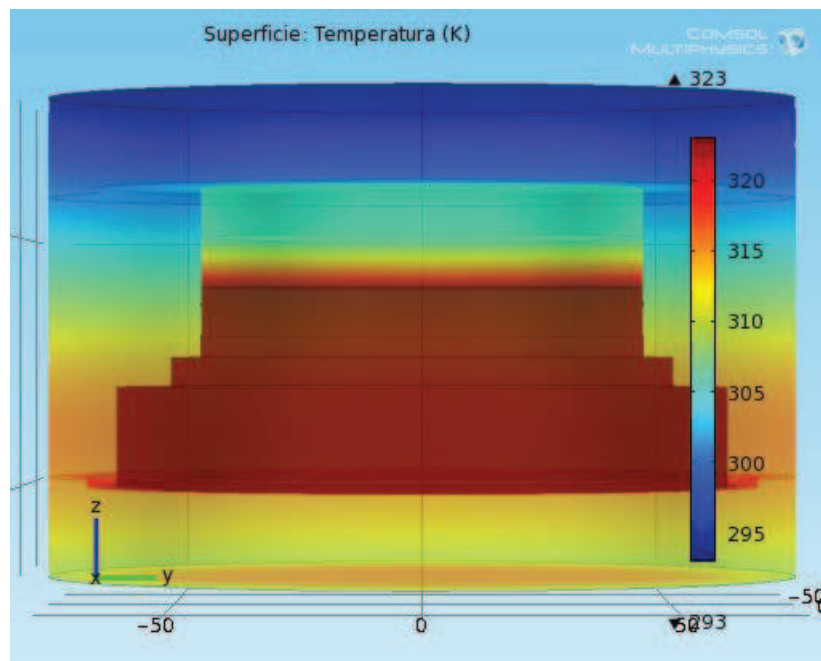


Figura 3.2: Vista frontal del calor generado en el equipo de conducción de calor

Fuente: propia.

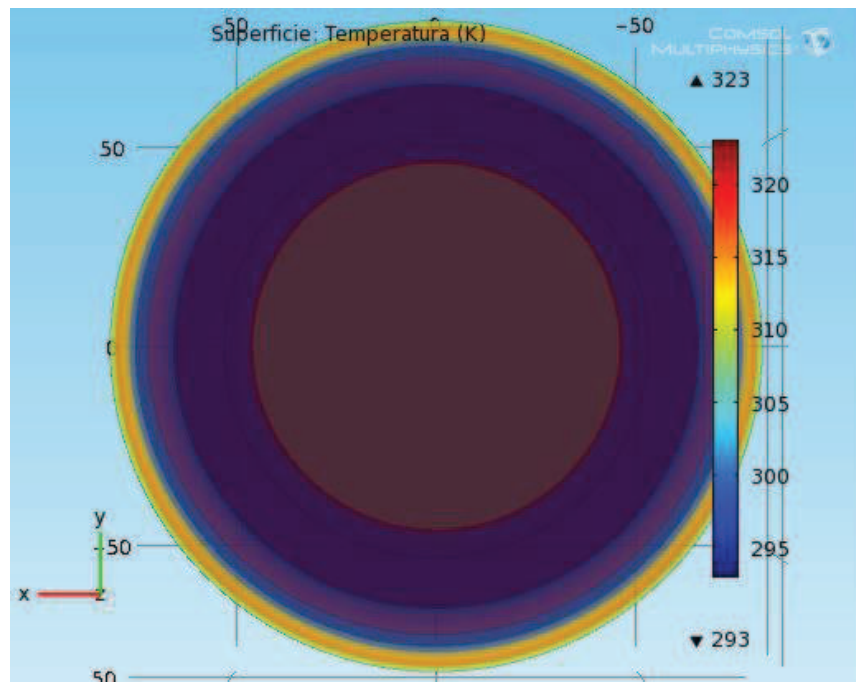


Figura 3.3: Vista inferior del calor generado en el equipo de conducción

Fuente: propia.

Las figuras 3.1, 3.2, 3.3, muestran la variación de la temperatura en los materiales sometidos a prueba, las zonas más oscuras son las que tienen mayor temperatura (la zona roja es que está a mayor calor) y se observa que en la superficie externa la temperatura tiende a ser la ambiental.

Los resultados de la temperatura en función de la posición para las probetas de cobre y muestra se los puede apreciar en la figura 3.4 y tabla 3.1, consecuencia de la simulación en COMSOL 4.0.

Tabla 3.1: Datos de la simulación en COMSOL 4.0, para las probetas.

ESPESOR (mm)	TEMPERATURA(K)
0	323
10	322,9
20	306,7
30	306,7

Fuente: Propia

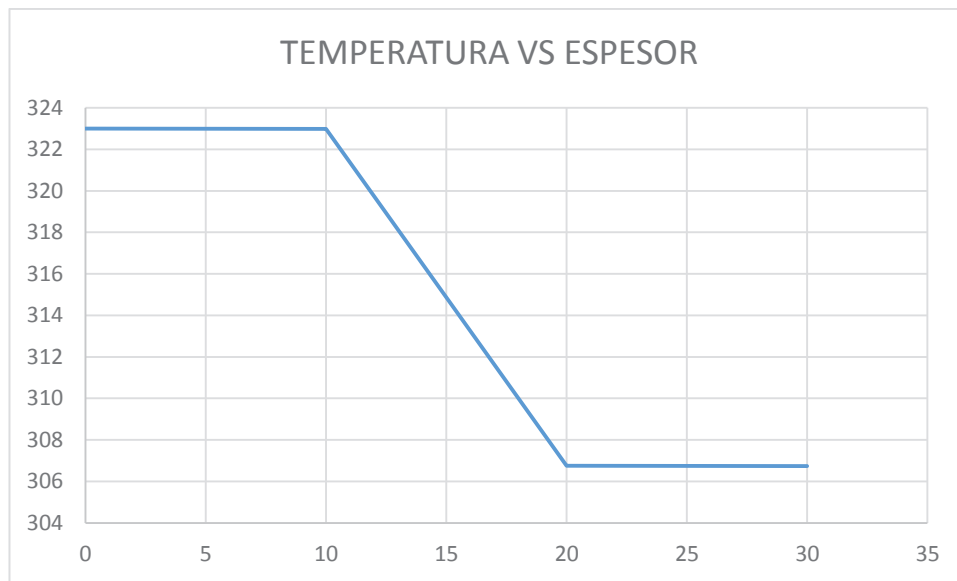


Figura 3.4: Distribución de temperaturas en cuerpos en contacto sometidos a conducción de calor

Fuente: propia.

3.3 POTENCIA REQUERIDA.

Para el diseño del equipo es necesario saber la potencia que debe ser suministrada a resistencia eléctrica calefactora en función del calor que se disipa por conducción.

3.3.1 PARÁMETROS Y VARIABLES QUE SE TOMAN EN CUENTA EN LOS MODELOS MATEMÁTICOS EN ESTADO ESTABLE.

En el cálculo de la potencia requerida se seleccionan los siguientes elementos.

- Espesor de las probetas de referencia y de la muestra.
- Área de contacto entre probetas.
- Conductividad térmica teórica de las probetas.
- Temperatura en las superficies en contacto probeta-probeta.

3.3.1 .2 Área de las probetas de referencia y de la muestra.

Las probetas son de forma cilíndricas por facilidad de cálculo y el diámetro de las probetas son de 88,9 mm., (3,5 pulgadas) lo que implica que el área de contacto es de $6207,167 \text{ mm}^2 = 0,006207167 \text{ m}^2$

3.3.1.3 Temperatura en las superficies en contacto probeta-probeta.

La temperatura máxima que se va a usar para el análisis de la conductividad de los elementos es de 325 K, se la obtendrá al usar un variador electrónico de temperatura controlado por medio del programa Labview.

3.3.1 .4 Cálculo de la potencia requerida para calentar la superficie de cobre en contacto con la placa calefactora.

Se establece los valores de todos los parámetros que influyen en el balance de energía en estado estable.

Se usa la ecuación 2.4 para obtener el valor de la potencia.

$$potencia = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L1}{k_{cu}A} + \frac{L2}{k_M A} + \frac{L3}{k_{cu}A}}$$

Los datos de temperatura se obtienen de la simulación en el programa COMSOL (ANEXO D). Se toma como referencia los 50°C como tope de calor que se puede generar por la resistencia.

3.3.1.5 propiedades físicas de las probetas. ANEXO C

Tabla 3.2: Propiedades físicas de algunos materiales

Cobre a 400 K			No metal(yeso)		
ρ (Kg/m ³)	K(W/mK)	Cp(J/mK)	ρ (Kg/m ³)	K(W/mK)	Cp(J/mK)
8933	380	380	1440	0,48	840

Fuente: propia

Resolviendo la ecuación 2.4 de energía para estado estable se obtiene:

$$potencia\ requerida = 5\ W$$

Hay que tomar en cuenta el coeficiente de seguridad de 1,2 considerando tolerancias sobre tensión del sector y sobre valor óhmico de la resistencia.¹⁶

Obteniendo:

$$\text{potencia requerida} = 6 \text{ W}$$

En el mercado nacional es de mucha facilidad encontrar resistencias tubulares, por lo que se usa la misma con un de 33 ohmios y generaremos con un transformador un voltaje de 24 voltios RMS (VA) que se introduce a la resistencia usando la ecuación 2.2 que utiliza la Ley de Ohm relacionada con la potencia se tiene:

$$P_e = 17,4 \text{ W}$$

La potencia eléctrica de 17,4 vatios calienta la placa calefactora de aluminio, la cual entrega aproximadamente los 6 vatios necesarios para calentar las placas de prueba.

3.3.2 RESOLUCIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS EN ESTADO TRANSITORIO.

3.3.2.1 Resolución de la ecuación de calor en estado transitorio.

Se resuelve la ecuación 2.27 de balance de energía en estado transitorio estableciendo los siguientes parámetros.

3.3.2.1.1 Capacitancia térmica.

La capacitancia térmica total es el coeficiente de la derivada de la temperatura respecto al tiempo y se la calcula con las propiedades físicas de cada uno de los materiales presentes en el equipo (cobre, aluminio, grilón, no metal).

En la tabla 3.3 se muestran algunas propiedades de los materiales.

¹⁶ <http://www.resistencias.com/esp/formulas.php>

Tabla 3.3: Propiedades físicas de los materiales usados.¹⁷

	ρ (kg/m ³)	k (w/mk)	Cp (J/Kgk)
Cu	8933	393	385
Al	2770	177	875
grillon	1120	0,23	1672
Aire			
Yeso	1800	0,81	837

Fuente: propia

- **Probeta de yeso.**

Volumen de la probeta.

$$V = \pi * L * (r^2)$$

$$V = 6,21(E - 05)m^3$$

Capacitancia térmica.

$$\rho * V * C_p = 1800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 6,21(E - 05)m^3 * 837\text{J/Kgk}$$

$$\rho * V * C_p = 93,51(\text{J/K})$$

- **Probetas de cobre.**

Volumen de la probeta

$$V = 6,21(E - 05)m^3$$

Capacitancia térmica.

$$\rho * V * C_p = 8933 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 6,21(E - 05)m^3 * 385\text{J/Kgk}$$

$$\rho * V * C_p = 213,48(\text{J/K})$$

¹⁷ INCROPERA F.; 1996; "Fundamentos de transferencia de calor"; Prentice hall; 4ta edición ; México; pág. 828.

Aislante térmico (grilón).

- Volumen de la probeta

$$V = \pi * L * (r_2^2 - r_1^2)$$

$$V = 0,00012\text{m}^3$$

- Capacitancia térmica.

$$\rho * V * C_p = 1120 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,00012\text{m}^3 * 1672\text{J/Kgk}$$

$$\rho * V * C_p = 224,72(\text{J/K})$$

3.3.2.2 Resolución de la ecuación de calor en estado transitorio para la placa caliente.

Sumatoria de capacitancias térmicas del cobre y aislante.

$$(\rho * V * C_p)_T = (213,48 + 224,72)(\text{J/K})$$

$$(\rho * V * C_p)_T = 438,2(\text{J/K})$$

Usando la ecuación de balance de energía para la placa caliente de energía es:

$$438,2 \frac{dT_2}{dt} = 6 + \frac{380 * 0,00622 * (T_2 - 323)}{0,01} - \frac{(T_2 - 293)}{\frac{L_n \left(\frac{0,075}{0,0445} \right)}{2 * \pi * 0,01 * 0,23}}$$

$$438,2 \frac{dT_2}{dt} = 6 + 236,4 * (T_2 - 323) - 0,028 * (T_2 - 293)$$

Se resuelve la ecuación en el programa Wolfram Matemática la temperatura en función del tiempo es:

$$T[t] = 323.0218248261627e^{-0.5395435874030123t}(-0.09294054617615767 + 1.e^{0.5395435874030123t})$$

El tiempo que se requiere para que la placa caliente llegue a la temperatura deseada y alcance el estado estable, desde la temperatura ambiente con la potencia establecida es el mostrado en la figura 3.5

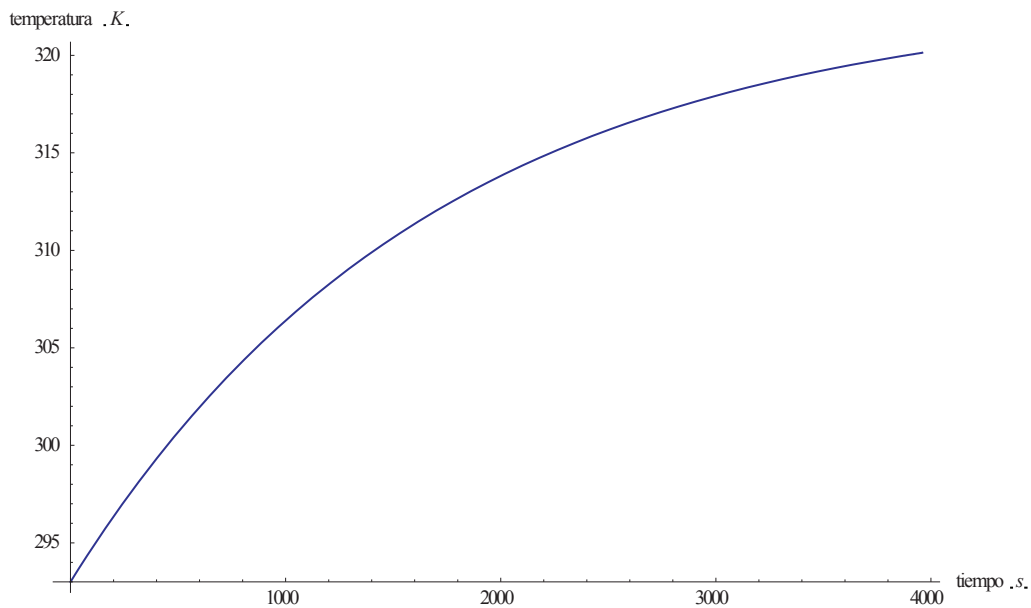


Figura 3.5: Comportamiento de la temperatura en función del tiempo.

Fuente: propia

3.3.2.3 Resolución de la ecuación de calor en estado transitorio para la muestra.

Sumatoria de capacitancias térmicas del yeso y aislante.

$$(\rho * V * C_p)_T = (93,51 + 224,72)(J/K)$$

$$(\rho * V * C_p)_T = 318,2(J/K)$$

Usando la ecuación de balance de energía para la muestra de energía se tiene:

$$318,2 * \frac{dT_3}{dt} = 4,7 + \frac{0,48 * 0,00622 * (T_3 - 322,97)}{0,01} - \frac{(T_3 - 293)}{\frac{L_n \left(\frac{0,075}{0,0445} \right)}{2 * \pi * 0,01 * 0,23}}$$

$$318,2 * \frac{dT_3}{dt} = 4,7 + 0,29 * (T_3 - 322,97) - 0,028 * (T_3 - 293)$$

Se resuelve la ecuación en el programa Wolfram Matemática la temperatura en función del tiempo es:

$$T[t] = 335.1110062893082e^{-0.0009993714644877436t}(-0.12566285648330183 + 1.e^{0.0009993714644877436t})$$

El tiempo que se requiere para que la probeta llegue a la temperatura deseada y alcance el estado estable, desde la temperatura ambiente con la potencia establecida es el mostrado en la figura 3.6

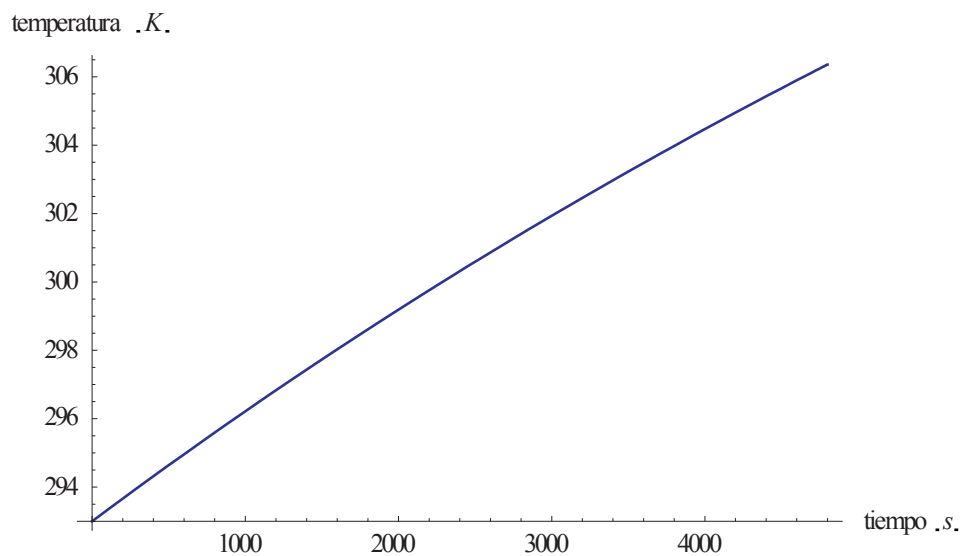


Figura 3.6: Comportamiento de la temperatura en función del tiempo.

Fuente: propia

3.3.2.4 Resolución de la ecuación de calor en estado transitorio para la placa fría.

Sumatoria de capacitancias térmicas del cobre y aislante.

$$(\rho * V * C_p)_T = (213,48 + 224,72)(J/K)$$

$$(\rho * V * C_p)_T = 438,2(J/K)$$

Usando la ecuación de balance de energía para la placa caliente de energía es:

$$438,2 \frac{dT_2}{dt} = 5,1 + \frac{393 * 0,00622 * (T_4 - 306)}{0,01} - \frac{(T_4 - 293)}{\frac{\ln\left(\frac{0,075}{0,0445}\right)}{2 * \pi * 0,01 * 0,23}}$$

$$438,2 \frac{dT_2}{dt} = 5,1 + 236,4 * (T_2 - 306) - 0,028 * (T_2 - 293)$$

Se resuelve la ecuación en el programa Wolfram Mathematica la temperatura en función del tiempo es:

$$T[t] = 306.02003146835403e^{-0.5395435874030123t}(-0.042546337263874356 + 1. e^{0.5395435874030123t})$$

El tiempo que se requiere para que la placa fría llegue a la temperatura deseada y alcance el estado estable, desde la temperatura ambiente con la potencia establecida es el mostrado en la figura 3.7

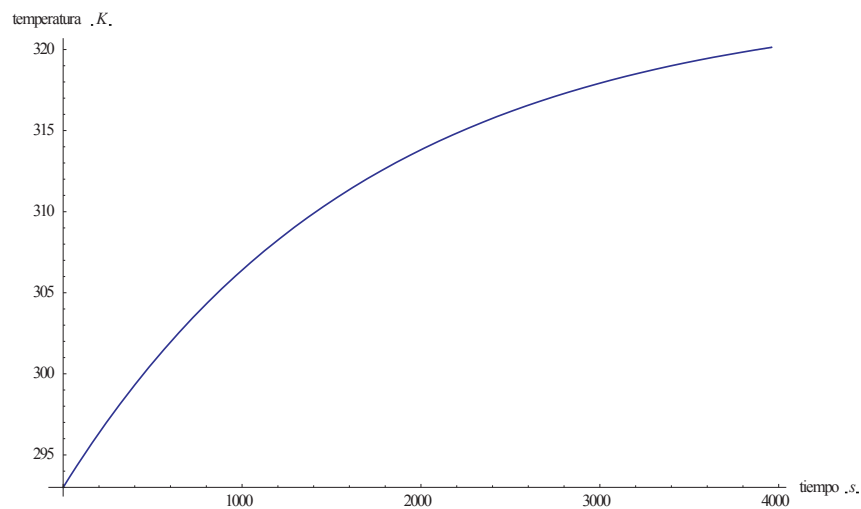


Figura3.7: Comportamiento de la temperatura en función del tiempo.

Fuente: propia

3.3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ESTADO TRANSITORIO.

La figura 3.5 señala que el tiempo que demora en estabilizarse la placa caliente de cobre es alrededor de 4020 segundos (67min), con una potencia de 6 vatios en la placa calefactora que está en contacto directo con la placa caliente de cobre.

La figura 3.6 señala que el tiempo que demora en estabilizarse la probeta no metálica alrededor de 4800 segundos (80min).

La figura 3.7 señala que el tiempo que demora en estabilizarse la placa caliente de cobre es alrededor de 4020 segundos (67min).

CAPITULO IV

CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

4.1 PARTES EN LAS QUE SE DIVIDE DEL EQUIPO.

- Cuerpo aislante.
- Tapa aislante.
- Base aislante.
- Placa calefactora
- Placa fría.
- Placa caliente.
- Placas no metálicas.
- Base del equipo.
- Control electrónico.

4.1.1 CUERPO AISLANTE.

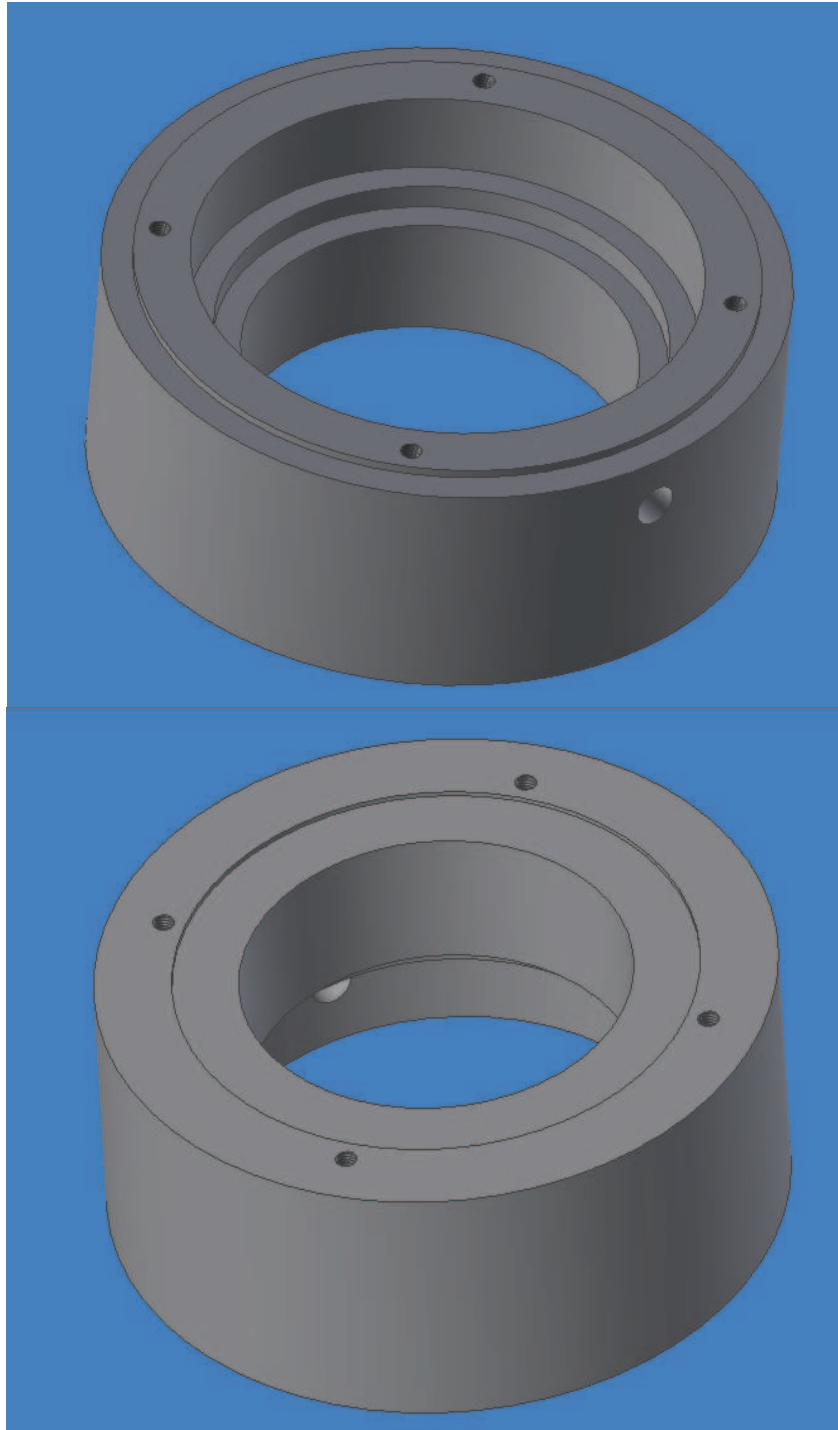


Figura 4.1: Cuerpo aislante.

Fuente: Propia

Se maquina el eje aislante como se observa en la figura 4.1 con el fin de acoplar en su interior la placa generadora de calor y las probetas de referencia y muestra, como se indica en el anexo H del plano 3107.005

4.1.2 TAPA AISLANTE.

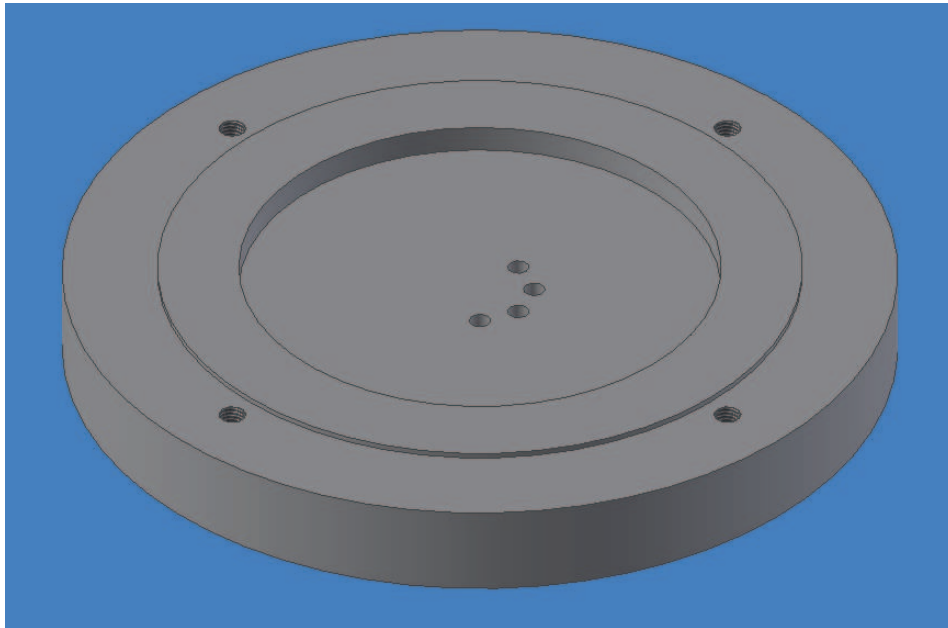


Figura 4.2: Tapa aislante

Fuente: Propia

La tapa de la figura 4.2 es fabricada para aislar la parte superior de las probetas y evitar el contacto directo con el ambiente, sus dimensiones son detalladas en el anexo H del plano 3107.001

4.1.2.1 Perforaciones roscadas

Se construyen cuatro perforaciones roscadas M 5x0.8 para acoplar la tapa al recubrimiento.

4.1.2.2 Perforaciones sin roscar.

Estas perforaciones son construidas con el fin de acoplar las termocuplas a las placas de ensayo, para realizar la medición de las temperaturas.

4.1.3 BASE AISLANTE.

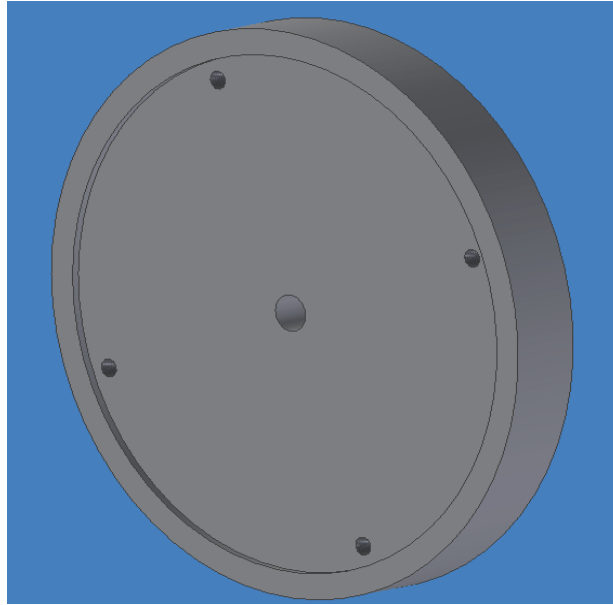


Figura 4.3: Base aislante.

Fuente: propia.

La base de la figura 4.3 sirve para aislar la placa calefactora evitando el choque térmico con el ambiente, se detallan sus dimensiones en el anexo H del plano 3107.008

4.1.3.1 Perforaciones roscadas.

Las perforaciones roscadas M 5x0.8 ésta sirven para unir la tapa protectora de la placa calefactora con la base aislante.

4.1.4 PLACA CALEFACTORA.

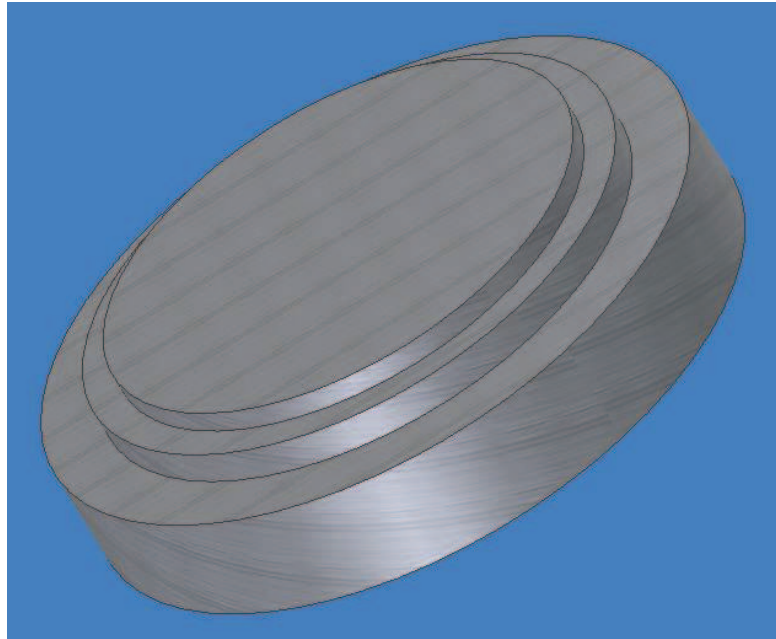


Figura 4.4: Placa calefactora.

Fuente: propia.

En la figura 4.4 se observa la placa calefactora la cual está fabricada de aluminio fundido y maquinado para acoplar la resistencia y lograr el calentamiento uniforme a las probetas de cobre y no metálica. Sus dimensiones se detallan en el anexo H de los planos 3107.006 y 3107.007

4.1.5 PLACA CALIENTE Y FRÍA.

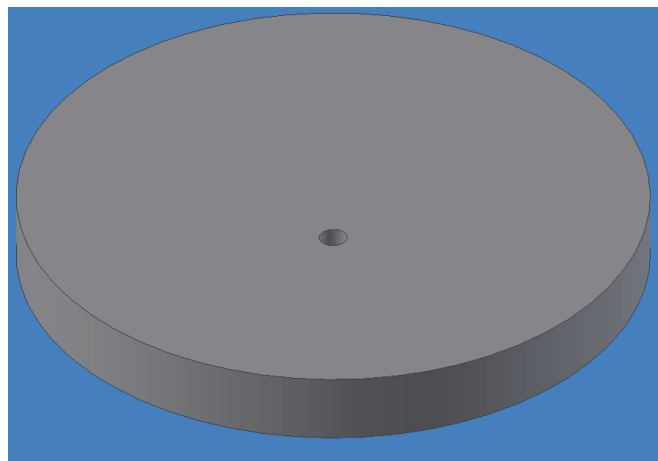


Figura 4.5: Placa caliente de cobre.

Fuente: propia.

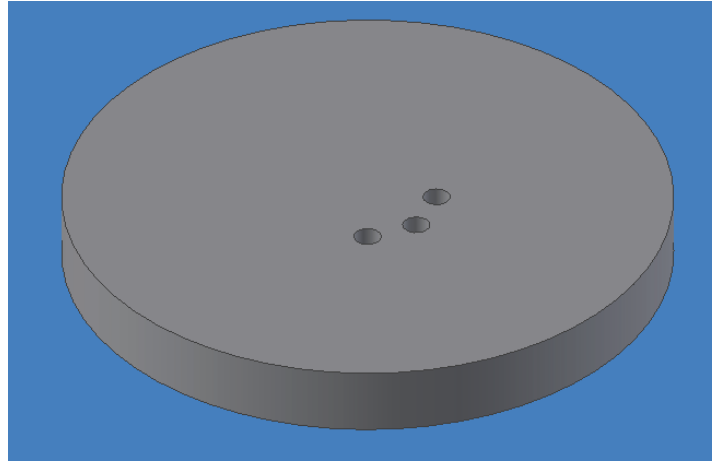


Figura 4.6: Placa fría.

Fuente: propia.

En la figura 4.6 se muestra el eje de cobre que es cortado y maquinado en forma de placa, el mismo va a ser usado con probeta de referencia en el equipo, la placa caliente va a tener contacto directo con la placa calefactora y la muestra, van a ser perforadas para acoplar el sensor de medición de temperatura, sus dimensiones son especificadas en el anexo H de los planos 3107.002 y 3107.004.

4.1.6 PLACA DE MUESTRA.

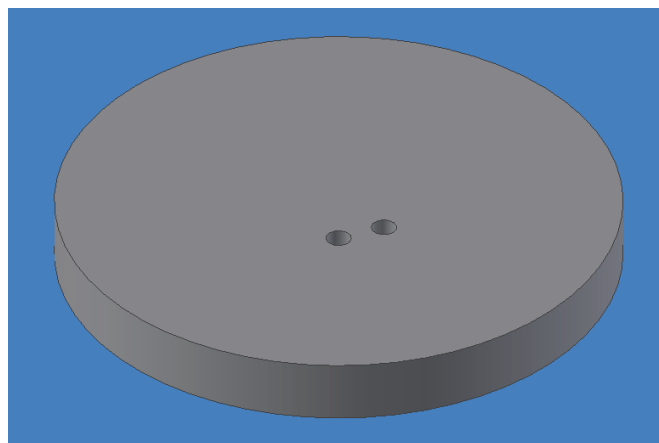


Figura 4.7: Placa muestra.

Fuente: propia.

En la figura 4.7 se indica la placa muestra que es fundida y maquinada según el material que la componga.

El yeso es puesto en un molde con las dimensiones requeridas es secado y luego lijado para mejorar su acabado, se hacen perforaciones para ubicar la termocupla.

Sus dimensiones están especificadas en el anexo H del plano 3107.003

4.1.7 BASE DEL EQUIPO.

La base o soporte es el elemento que va a acoplar el equipo de conducción de calor y el controlador electrónico. Es fabricado varilla de acero al carbono, cortada, soldada y pintada.

4.1.8 CONTROL ELECTRÓNICO.

Consta de un micro controlador llamado **Arduino** que lee las señales de las termocuplas, controla el accionamiento de un relé y comunica la computadora al sistema.

HMI, que es la interfaz de usuario, donde se ve el funcionamiento de las termocuplas, se setea los parámetros, guarda datos y realiza gráficas.

Circuito de acondicionamiento de sensores, el cual procesa el voltaje de las termocuplas para tener voltajes aceptables por el Arduino. Las termocuplas entregan un voltaje de $41\text{mv}/^{\circ}\text{C}$.

Relé, controla el energizado de la resistencia.

Fuente de 5 voltios DC para la tarjeta de acondicionamiento.

Transformador 110 a 24 voltios DC para controlar el energizado del relé.

Transformador 110 a 24 voltios AC para controlar la potencia de la resistencia.

Master on/off, controla el energizado de la resistencia.

Cable USB, comunica la computadora con el Arduino, la computadora es la fuente del Arduino.

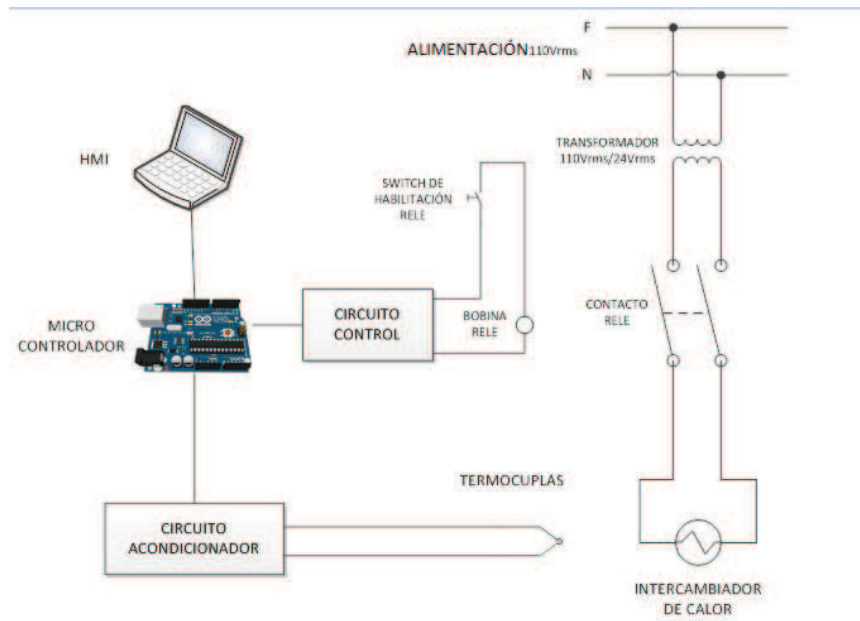


Figura 4.8: Esquema del control electrónico.

Fuente: propia.

Todos estos dispositivos electrónicos conectados como se indica en la figura 4.8 funcionan mediante el programa Labview como se indica en el anexo F.

4.2 MONTAJE DEL EQUIPO.

Se ensambla el equipo de acuerdo al plano de conjunto 3107.009. Los subgrupos son los siguientes.

- Base carcaza de la resistencia-resistencia- tapa carcaza de la resistencia.
- Placa calefactora- cuerpo aislante.
- Placa caliente-muestra-placa fría.
- Cuerpo aislante y placa calefactora- base aislante.

4.2.1 BASE CARCAZA DE LA RESISTENCIA- RESISTENCIA- TAPA CARCAZA DE LA RESISTENCIA.

La resistencia eléctrica es ubicada dentro de la base carcasa y aislada por la tapa carcasa.

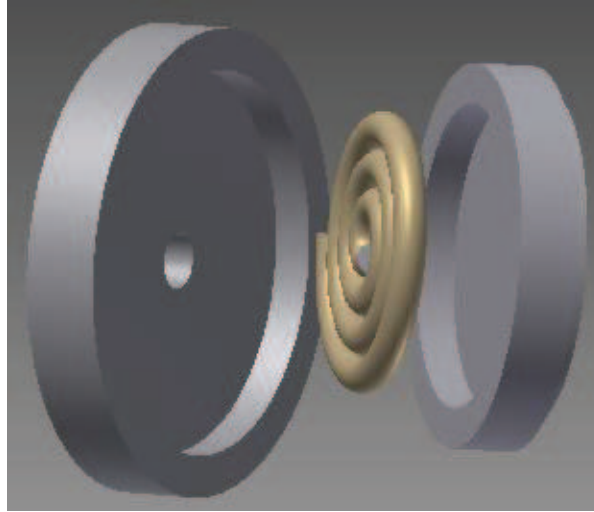


Figura 4.9: Elementos de la placa calefactora.

Fuente: propia.

Obteniendo la placa calefactora.

4.2.2 PLACA CALEFACTORA- CUERPO AISLANTE.

La placa calefactora entra en el cuerpo aislante con apriete, como se muestra en la figura 4.10 y 4.11



Figura 4.10: Montaje de placa calefactora- cuerpo aislante, vista inferior.

Fuente: Propia

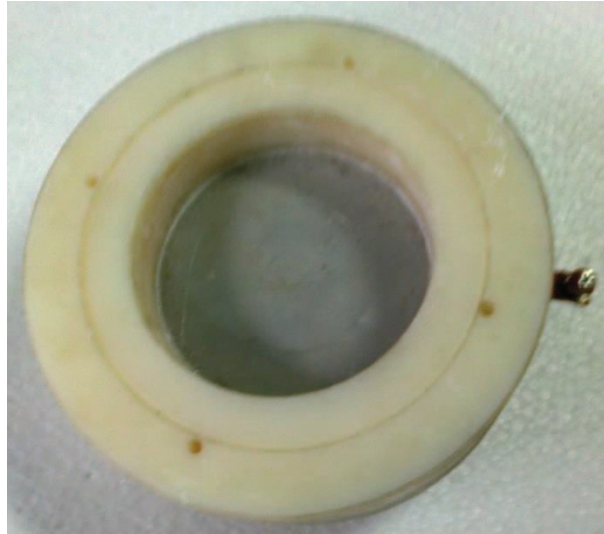


Figura 4.11: Montaje de placa calefactora- cuerpo aislante, vista superior.

Fuente: Propia

4.2.3 PLACA CALIENTE-MUESTRA-PLACA FRÍA.

Las placas son montadas en forma de sánduche, primero la placa de cobre que va a estar en contacto directo con la placa calefactora, luego la placa muestra y finalmente la placa de cobre fría como se indica en la figura 4.12.



Figura 4.12: Placa caliente-muestra-placa fría

Fuente: Propia

4.2.4 CUERPO AISLANTE Y PLACA CALEFACTORA- PROBETAS- BASE AISLANTE.

Se une la base aislante con el cuerpo aislante con pernos avellanados, posteriormente se procede a introducir dentro del cuerpo aislante las probetas de cobre y muestra, también se une la tapa aislante al cuerpo aislante quedando todas las placas en el interior, finalmente se ubica las termocuplas en los orificios porta termocuplas, como se muestra en la figura 4.13.



Figura 4.13: Equipo de conducción de calor.

Fuente: Propia.

4.2.5 EQUIPO COMPLETO

El equipo es posicionado en la base metálica, al igual que el control electrónico que servirá para medir los valores experimentales de la conducción de calor.

Para las mediciones de temperatura se usa termocuplas tipo K, las cuales son adecuadas para la configuración realizada en el programa y micro controlador electrónico llamado Arduino. El equipo completo se muestra en la figura 4.14.

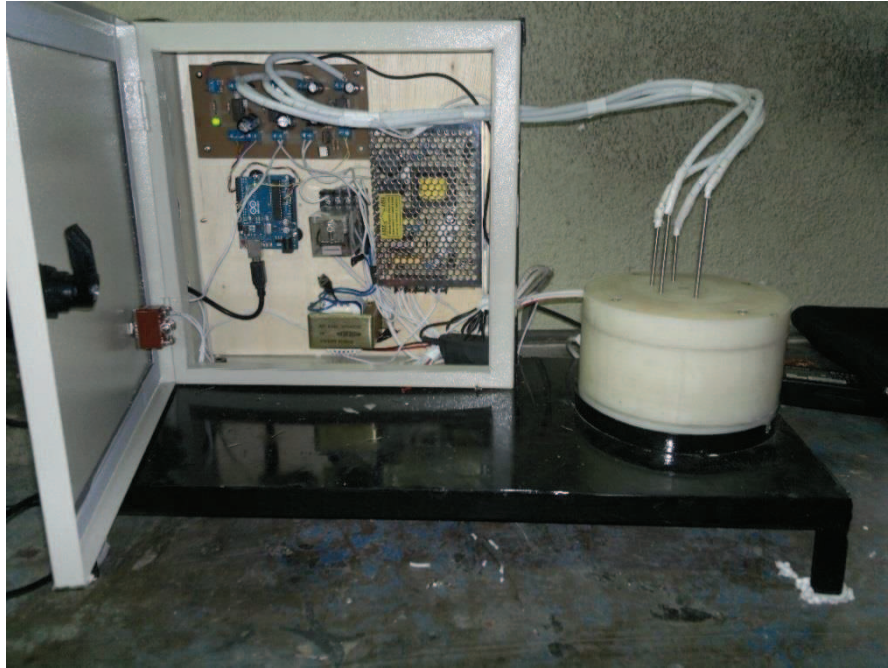


Figura 4.14: Equipo completo de conducción de calor por conducción.

Fuente: Propia.

4.3 COSTOS DEL EQUIPO.

El análisis de los costos del equipo considera los costos directos e indirectos, ya sea de la materia prima, costos de producción, montaje, costos de ingeniería e imprevistos.

4.3.1 COSTOS DIRECTOS

Los costos directos son los que afectan directamente a la construcción del equipo.

Los costos directos son:

- Materia prima.
- Costos de construcción.
- Elementos eléctricos y electrónicos.
- Elementos de medición.

4.3.1.1 Materia prima.

Son los elementos que afectan directamente en la construcción y necesitan algún tipo de maquinado.

Tabla 4.1: Costo de la materia prima

Material	Cantidad	Costos total (USD)
Grilón	1	100
Cobre	1	120
Aluminio	1	30
Resistencia eléctrica	1	120
Yeso	1	5
Sub total		375

Fuente: Propia

4.3.1.2 Costos de construcción.

Los costos de construcción incluyen las operaciones de fundición y maquinado

Tabla 4.2: Costos de construcción.

Proceso	# Elementos	Costos total (USD)
Fundición del aluminio	2	40
Maquinado del aluminio	2	10
Maquinado del grilón	3	40
Moldeado del yeso	1	5
		95

Fuente: Propia

4.3.1.3 Elementos eléctricos y electrónicos.

Tabla 4.3: Costos de materiales eléctricos y electrónicos.

Material	Cantidad	Costos total (USD)
Tarjeta electrónica	1	60
Circuitos integrados AD595	4	140
Relé	1	30
Transformador AC	1	15
Fuente de 24 voltios DC	1	32
Fuente de 4 voltios DC	1	8
Cable USB	1	13
Cables eléctricos	5 metros	12
Enchufes	1	2
Master on/off	1	5
Caja térmica	1	28
Sub total		345

Fuente: Propia

4.3.1.4 Elementos de medición.

Los elementos de medición son cuatro termocuplas tipo k cuyo costo total es de 124 USD.

4.3.2 COSTOS INDIRECTOS

Los costos indirectos son:

El soporte del equipo y pintura tiene un costo de 25 USD.

En los costos indirectos se incluye el costo de ingeniería y es 800 USD.

La suma total de los costos indirectos es 825 USD

4.3.3 COSTOS TOTALES.

Los costos totales son la suma de los costos directos e indirectos.

Tabla 4.4: Costos totales de producción.

	Total (USD)
Costos directos	939
Costos indirectos	825
Total de costos	1764

Fuente: Propia

CAPÍTULO V

PRUEBAS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL EQUIPO DE CONDUCCION DE CALOR EN NO METALES.

5.1.1 PRUEBA EXPERIMENTAL EN EL YESO

Se procedió a tomar las temperaturas en los cuatro puntos de medición de cada superficie, en intervalos de un minuto, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.5.

Tabla 5.1: Tabla de toma de medidas experimentales.

Tiempo(s)	Temperatura Fuente de calor-placa caliente(K)	Temperatura Placa caliente-probeta (K)	Temperatura probeta-placa fría(K)	Temperatura placa fría-aislante(K)
0	293,3	291,6	290,2	290,6
60	293,8	292,1	290,8	290,1
120	293,8	292,1	290,8	290,1
180	294,8	293,0	291,3	290,6
240	295,3	293,0	291,9	290,1
300	295,9	293,0	291,9	291,1
360	296,4	293,5	292,4	291,1
420	296,9	293,5	292,4	291,5
480	297,9	294,4	292,4	291,1
540	297,9	294,4	292,4	291,1
600	299,0	294,9	292,9	291,5
660	299,5	295,3	292,9	291,5
720	299,5	295,3	292,9	291,5
780	300,5	296,3	292,9	292,0

840	301,0	296,3	294,0	292,0
900	302,1	296,7	294,0	292,0
960	302,1	296,7	294,6	292,0
1020	302,6	297,2	294,6	292,5
1080	303,6	297,7	294,6	292,0
1140	304,2	298,1	295,1	292,5
1200	304,2	298,6	295,6	293,0
1260	305,2	299,1	295,1	293,0
1320	306,2	299,5	296,2	293,4
1380	306,2	299,5	295,6	293,0
1440	306,8	300,0	296,2	293,9
1500	307,3	300,5	296,2	293,4
1560	307,8	300,5	296,2	293,9
1620	308,3	301,4	296,7	294,4
1680	309,4	300,9	296,7	294,9
1740	308,8	301,9	297,3	294,9
1800	309,4	301,9	298,3	294,9
1860	309,9	302,3	298,3	295,3
1920	310,9	302,8	298,3	295,3
1980	310,9	303,3	297,8	295,3
2040	311,4	303,7	298,9	295,3
2100	312,0	304,2	298,9	295,8
2160	313,0	305,1	298,9	296,8
2220	313,5	305,6	299,4	296,8
2280	314,6	306,1	299,4	297,7
2340	315,1	306,1	300,5	297,2
2400	315,1	306,1	299,4	297,7
2460	315,6	306,5	300,5	297,7
2520	316,1	306,5	300,5	298,2
2580	316,1	307,0	301,0	298,2
2640	316,6	307,4	301,0	298,2
2700	317,1	307,9	301,6	299,1
2760	317,1	308,4	301,0	298,7
2820	317,7	308,4	301,6	298,7
2880	318,2	308,4	302,1	298,7
2940	318,7	308,8	302,6	299,1
3000	318,7	309,3	302,6	299,1
3060	319,2	309,3	303,2	299,6

3120	319,7	310,2	303,2	300,1
3180	320,3	310,2	303,2	300,6
3240	320,8	310,7	304,3	300,1
3300	320,8	310,2	304,3	300,6
3360	321,8	311,2	304,3	301,0
3420	321,8	311,6	304,8	301,0
3480	322,3	311,6	305,3	301,5
3540	322,3	311,6	304,8	301,0
3600	322,9	312,1	305,3	301,5
3660	322,9	312,6	305,9	302,0
3720	323,4	312,6	305,9	302,0
3780	323,4	313,0	305,9	302,5
3840	323,9	313,5	305,9	302,0
3900	322,9	312,6	305,3	302,0
3960	322,9	313,0	305,9	302,0
4020	322,9	313,0	305,9	302,0
4080	322,3	313,0	305,3	302,0
4140	322,3	313,0	305,3	302,5
4200	322,3	313,5	305,9	301,5

Fuente: propia



Figura 5.1: Resultados experimentales de temperatura vs tiempo.

Fuente: propia

5.1.2 GRÁFICOS DE COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS EN ESTADO TRANSITORIO

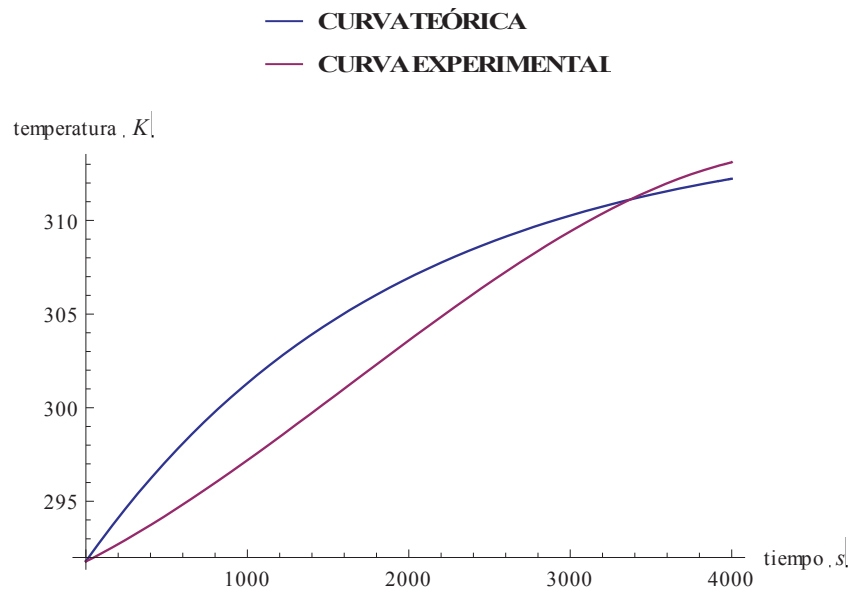


Figura 5.2: Temperatura vs tiempo de datos experimentales y teóricos en estado transitorio para el cobre caliente.

Fuente: propia

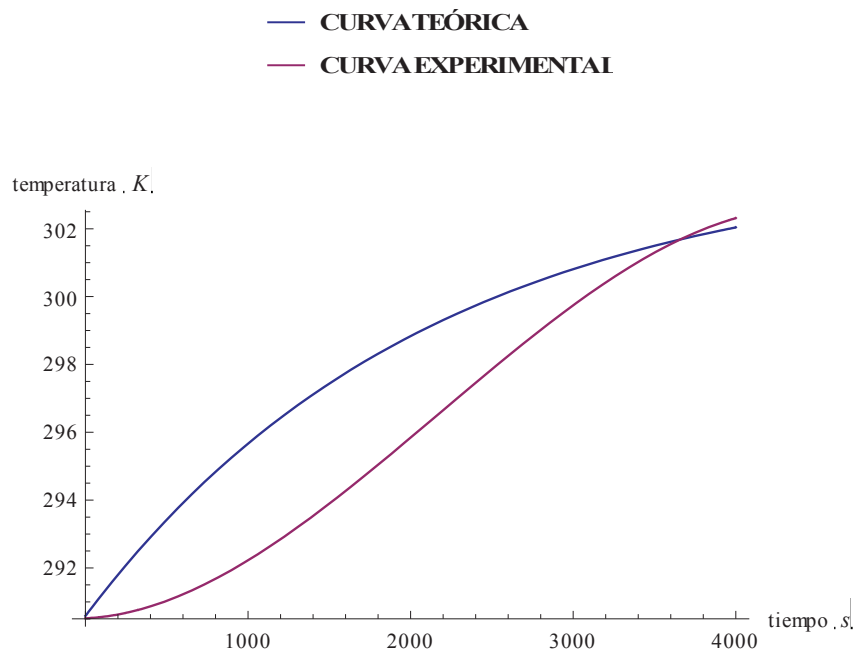


Figura 5.3: Temperatura vs tiempo de datos experimentales y teóricos en estado transitorio para el cobre frío.

Fuente: propia

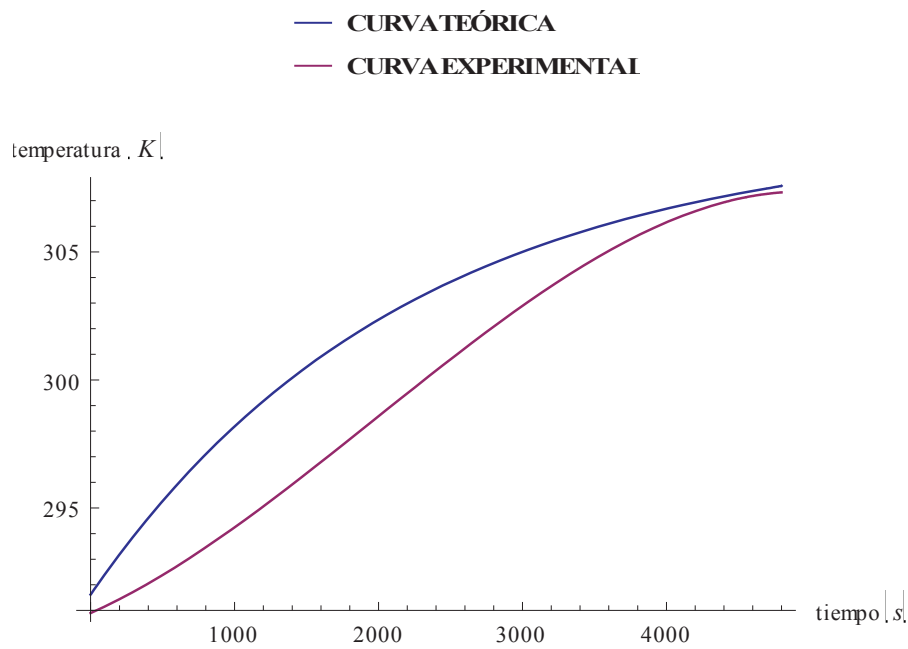


Figura 5.4: Temperatura vs tiempo de datos experimentales y teóricos en estado transitorio para la muestra.

Fuente: propia

5.3 CÁLCULO DEL COEFICIENTE EXPERIMENTAL DE CONDUCCIÓN DE CALOR.

5.3.1 COEFICIENTE DE CONDUCCIÓN DE CALOR.

Para el cálculo del coeficiente de conducción de calor se toman los datos en estado estable de la temperatura en las superficies analizadas en las placas de cobre.

Tabla 5.2: Temperaturas máximas en estado estable

Temperatura 1	322,343
Temperatura 2	301,52

Fuente: propia

Con la ecuación 2.35 se calcula el coeficiente de conducción de calor el cual resulta:

$$k_m = 0,46$$

El coeficiente de conducción teórico se lo encuentra en tablas, para nuestro fin, se encuentra ilustrado en el anexo C.

El coeficiente teórico de transferencia de calor es de 0,48 (W/mK)

5.3.1 ANÁLISIS DEL ERROR ENTRE EL COEFICIENTE DE CONDUCCIÓN DE CALOR TEÓRICO Y EXPERIMENTAL.

$$error = \frac{|0,48 - 0,46|}{0,48} 100\% = 4,16\%$$

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

- De acuerdo a los resultados obtenidos, comparados con los obtenidos en tablas, y los calculados con la experimentación, se observa que los valores están dentro del margen, y difieren en mínimo, debido a que el equipo tiene perdidas no muy significativas por convección y radiación, las cuales no se las toma en cuenta, debido a que son demasiado pequeñas.
- La curva que se obtiene tiene picos, pero al coger una línea de tendencia se observa que son casi las mismas que las simuladas en los programas de elementos finitos.
- De acuerdo al error calculado, los resultados obtenidos son los mismos y aceptables.
- Los picos de los gráficos se deben a corrientes parasitas que influyen en la sensibilidad del equipo, debido a que no es un sistema industrial, en el cual se tiene más dispositivos electrónicos que filtran esas corrientes. Donde se utilizan dispositivos que están al alcance de industrias, y no de personas naturales.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES.

- Con el presente tema de titulación se ha cumplido con el objetivo principal, que es: diseñar y construir un equipo para el estudio de la Transferencia de calor por conducción de los materiales no metálicos, con resultados que aprueban el funcionamiento del equipo.
- Con el presente equipo se lograra reforzar el conocimiento teórico impartido en clases, y así poder entender a profundidad el comportamiento de los materiales y poder relacionarlos con las experiencias a nivel profesional y cotidiano.
- Los resultados obtenidos en la simulación y los experimentales se asemejan, considerando un cierto error entre el teórico y el experimental, que con el análisis se determina que es aceptable y refleja una realidad.
- Los resultados obtenidos en la simulación y los experimentales, difieren en cierto valor debido a que el simulador se basa en ecuaciones teóricas y no empíricas, que son resultados por métodos de diferencias finitas.
- Se puede analizar el tiempo de estabilización con diferentes muestras no metálicas y sacar la conductividad térmica de cada una de ellas.
- El coeficiente de conductividad térmica se puede ver con la experimentación que varía según la temperatura, a más alta temperatura disminuye.
- Se puede observar que los diferentes tipos de aparatos para la medición de la conductividad tienen una variación mínima que es aceptable en la obtención de resultados.
- Por los resultados obtenidos, en la diferencia de la construcción del equipo, se concluye que los las propiedades físicas de los materiales no cambien o difieren significativamente, de equipo para materiales metálicos y para no

metálicos, dependiendo de la temperatura a la que el material analizado soporte en el equipo.

- Este equipo no se lo utiliza para materiales metálicos, debido a que ellos soportan temperaturas mucho más altas, que para las que está diseñado el equipo.

6.2 RECOMENDACIONES

- Utilizar el equipo de manera adecuada, de acuerdo a las características de diseño, que no pueden utilizar temperaturas mayores a 90 ± 10 °C.
- Para utilizar el equipo en mención, se deberá realizar un previo reconocimiento del equipo, para entender el funcionamiento del mismo y poder obtener resultados óptimos.
- Al momento de realizar la práctica, realizar paso a paso el procedimiento de encendido y toma de datos del sistema de control automático, mencionados en la guía de prácticas.
- Realizar un precalentamiento del equipo de un tiempo aproximado de 2 minutos para una obtención de datos más óptima.
- En caso de pérdida de comunicación con el sistema de control, resetear en dispositivo electrónico llamado Arduino, especificado en el diagrama de componentes.
- Revisar que los instrumentos de medición (termocuplas), estén en la posición correcta, para obtener datos reales.
- Se recomienda adquirir la licencia de los programas utilizados, Comsol Labview y Visa, Wolfram Matemática}, para no tener inconvenientes al momento de realizar su instalación.

BIBLIOGRAFÍA:

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; "ASTM C518 Standard Test Method for Steady –State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of Heat Flow Meter Apparatus"; 2004.
- KREITH F.; 1970; "Principios de transferencia de calor"; Herrero hermanos, sucesores, S.A.; primera edición; México.
- INCROPERA F.; 1996; "*Fundamentos de transferencia de calor*"; Prentice hall; 4ta edición; México.
- HOLMAN J. P.; 1999; "Transferencia de calor"; CECSA; Décima edición; México.
- NECATI OZISIK; 1993; "Heat Conduction"; Second edition; JHON WILLEY & SONS. INC; USA.
- <http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/588-sensores-de-temperatura-rtd>
- <http://www.nth.com.ar/panel/Web/Upload/ProductDocument/f9f20a15fed0008ba3a26677fe7d6e50.pdf>
- <http://www.resistencias.com/esp/formulas.php>
- <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/7609/Capitulo3.pdf>
- <http://www.mikai.com.mx/tubulares.htm>

ANEXOS

**ANEXO A: DESCRIPCIÓN DE UNA RESISTENCIA ELECTRICA
TUBULAR¹⁸**

¹⁸ <http://www.mikai.com.mx/tubulares.htm>

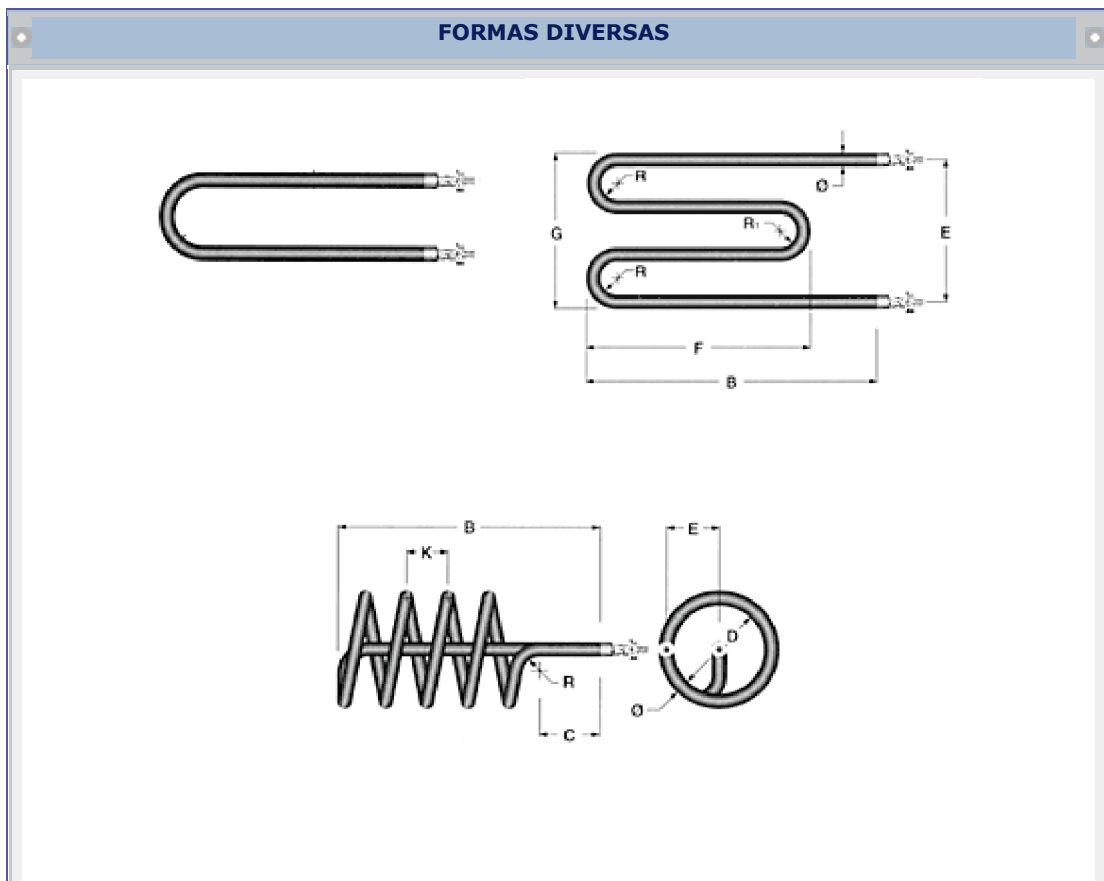
RESISTENCIAS TUBULARES

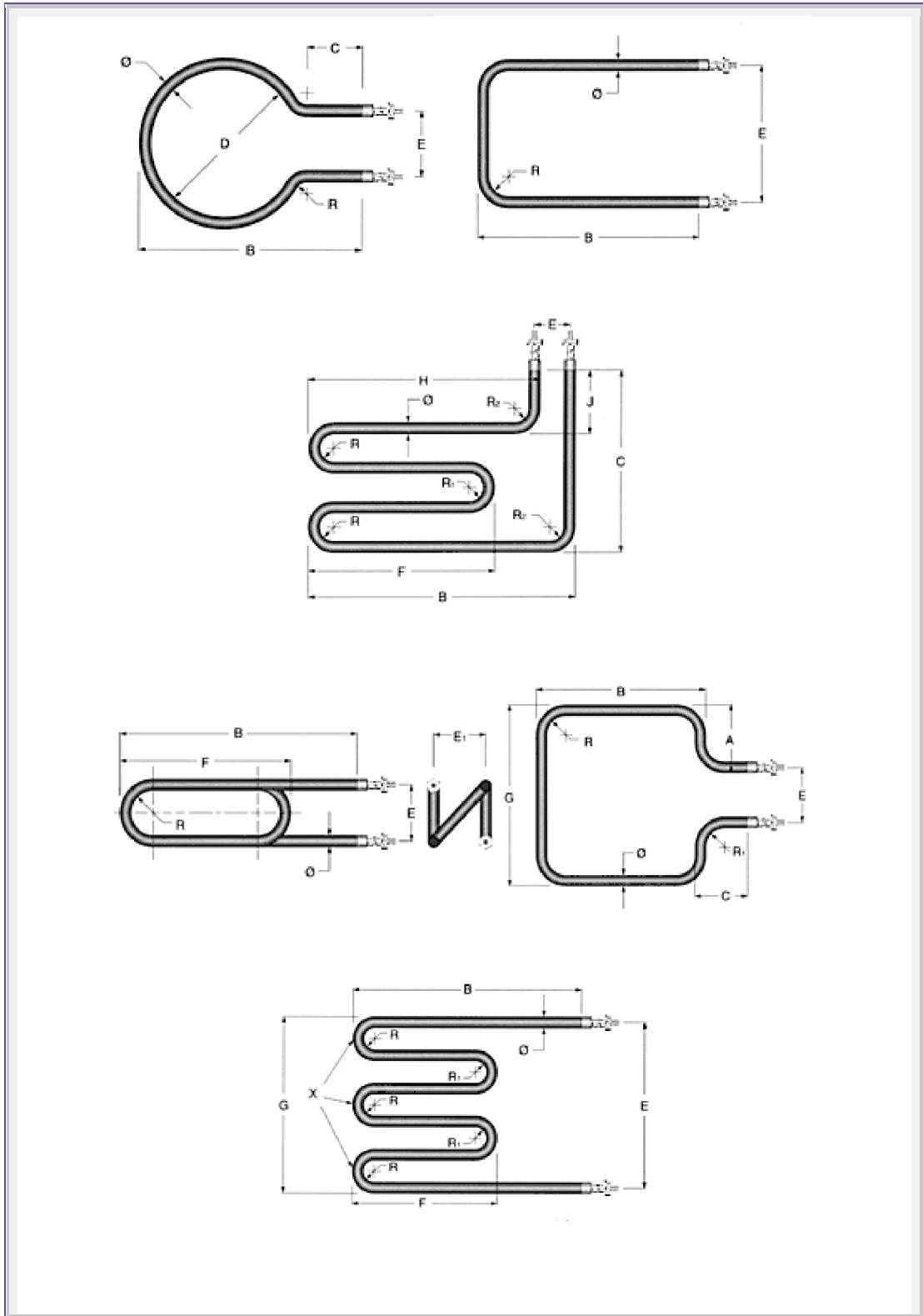
PARA PEDIR INFORMACIÓN TENGA A LA MANO LAS SIGUIENTES MEDIDAS, ASÍ COMO LOS WATTS Y VOLTS

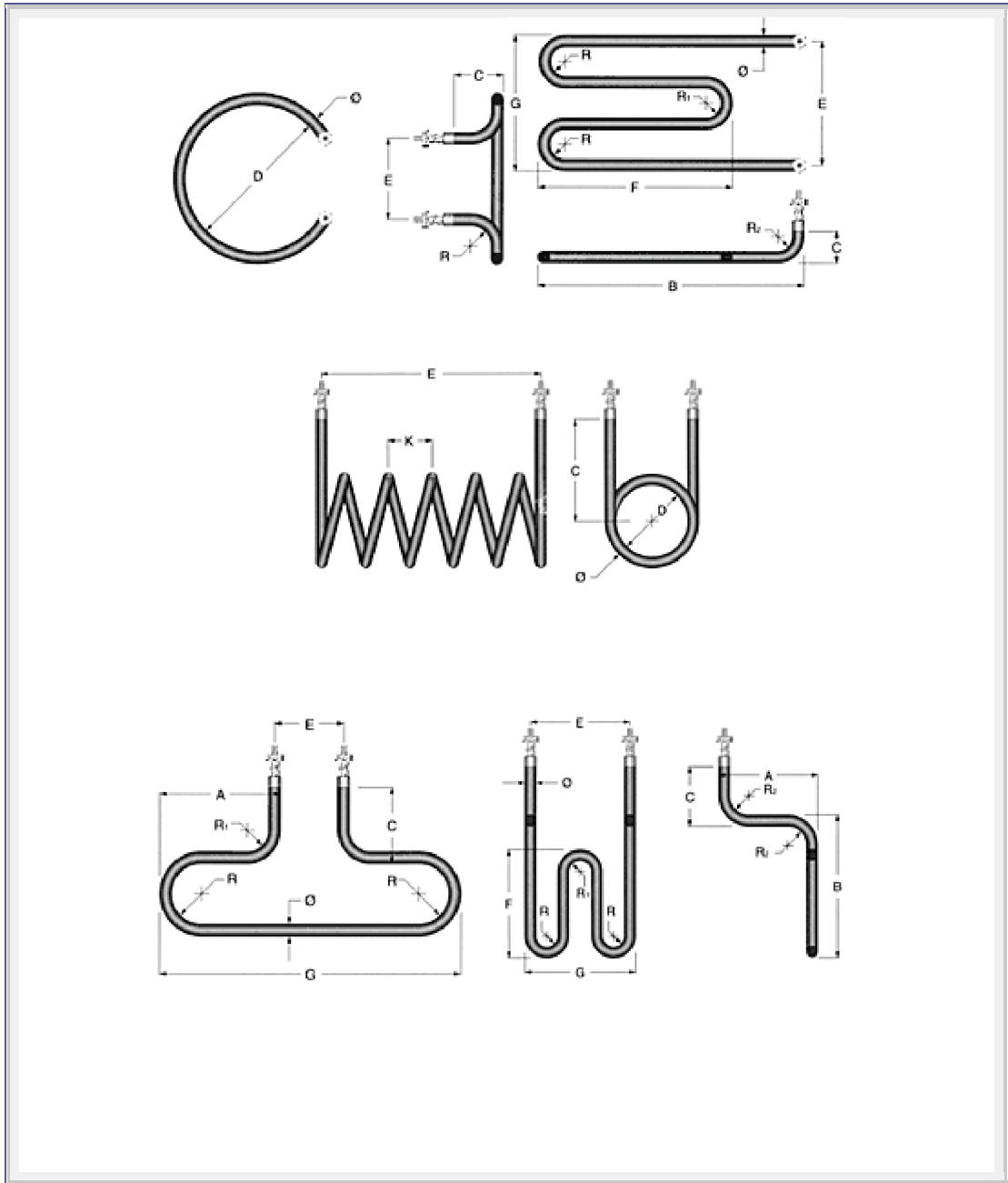


TUBULAR RECTA

DIÁMETROS DISPONIBLES 1/4", 5/16", 3/8" 7/16", 1/2", ALIMENTACIÓN DE 120V, 240V, 440V POTENCIA DE CALENTAMIENTO PROPORCIONAL A LA LONGITUD APROXIMADAMENTE 10 WATTS X CM. LINEAL, EN ACERO INOXIDABLE, 18 WATTS X CM. LINEAL EN INCOLOY.







ANEXO B: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL GRILÓN.

CARACTERÍSTICAS DEL GRILON®


	PROPIEDADES	Método de prueba DIN-ASTM	Unidades	Valores
GENERALES	Peso específico	-	gr/cm ³	1.12-1.15
	Absorción de humedad:			
	- en aire - en agua		% %	2.0-2.5 3.0-6.5
MECÁNICAS	Resistencia a la tracción	ASTM D638	kg/cm ²	450-720
	Elongación a la tracción	ASTM D638	%	25-70
	Resistencia a la compresión (deformación 1%)	ASTM D595	kg/cm ²	650
	Resistencia a la compresión sin deformación permanente	-	kg/cm ²	110-140
	Resistencia a la flexión	DIN53452 ASTM D789	kg/cm ²	800-1200
	Módulo de elasticidad	ASTM D638	kg/cm ²	8000-24000
	Resistencia al esfuerzo cortante	ASTM D732	kg/cm ²	450-650
	Resistencia al impacto a 20°C	DIN53453	kg/cm ²	sin rotura
	Resistencia al impacto a -40°C	DIN 53453	kg/cm /cm ²	60-100-
	Resistencia al impacto con rotura	DIN 53453	kg/cm/cm ²	8 sin rotura
	Dureza a la penetración de la bola (50 segundos)	DIN 53456	kg/cm/cm ²	450-650
	Dureza Shore D	-	-	75-85
TÉRMICAS	Punto de fusión	ASTM D789	°C	205-220
	Coefficiente de dilatación lineal		mm/mm/1°C	$8 \cdot 10^{-5}$ - $12 \cdot 10^{-5}$
	Coefficiente de conductibilidad térmica		kcal/mh°C	aprox. 0.2
	Calor específico a 20°C		kcal/kg°C	aprox. 0.4
	Temperaturas de utilización:		°C	
- per corto tiempo			140-150	
- continua en aire			80-110	
- continua en gas inerte			110-120	
- Continua en aceite			70-80	
- Continua en agua			100-110	

**ANEXO C: PROPIEDADES TERMOFISICAS DEL COBRE
ALUMINIO Y NO METALES.**

Composición	Punto de fusión (K)	Propiedades a 300 K					Propiedades a varias temperaturas (K)							
		ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg · K)	k (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	k (W/m · K)/ c_p (J/kg · K)								
						100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000
Acero puro	1810	7870	447	80.2	23.1	134	94.0	69.5	54.7	43.3	32.8	28.3	32.1	671
Aceros al carbón														
Carbón ordinario (Mn \leq 1%, Si \leq 0.1%)	1810	7854	434	60.5	17.7	216	384	490	574	680	975	609	654	804
AISI 1010	1810	7832	434	63.9	18.8	216	384	487	559	685	1169	320	344	404
Carbón-silicio (Mn \leq 1%, 0.1% < Si \leq 0.6%)	1810	7817	446	51.9	14.9	216	384	487	559	685	1168	320	344	404
Carbón-manganeso-silicio (1% < Mn \leq 1.65%, 0.1% < Si \leq 0.6%)	1810	8131	434	41.0	11.6	216	384	42.2	39.7	35.0	27.6	230	111	174
Aceros con cromo (bajo)														
1Cr-1Mo-Si (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)	1810	7822	444	37.7	10.9	216	384	38.2	36.7	33.3	26.9	230	111	174
1Cr-1Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)	1810	7858	442	42.3	12.2	216	384	492	575	688	969	320	344	404
1Cr-V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)	1810	7836	443	48.9	14.1	216	384	42.0	39.1	34.5	27.4	230	111	174
Aceros inoxidables														
AISI 302	1810	8055	480	15.1	3.91	216	384	17.3	20.0	22.8	25.4	230	111	174
AISI 304	1670	7900	477	14.9	3.95	216	384	51.2	55.9	58.5	60.6	230	111	174
AISI 316	1810	8238	468	13.4	3.48	272	402	16.6	19.8	22.6	25.4	28.0	31.7	682
AISI 347	1810	7978	480	14.2	3.71	216	384	51.5	55.7	58.2	61.1	640	682	810

TABLA A.1 Continuación

Composición	Punto de fusión (K)	Propiedades a 300 K					Propiedades a varias temperaturas (K)									
		ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg · K)	k (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	k (W/m · K)/ c_p (J/kg · K)										
						100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500	
Aluminio puro	933	2702	903	237	97.1	302	237	240	231	218						
Aleación 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2770	875	177	73.0	482	798	949	1033	1146						
Aleación 195, vaciado (4.5% Cu)		2790	883	168	68.2	473	787	925	1042							
Armco (99.75% puro)		7870	447	72.7	20.7	95.6	80.6	65.7	53.1	42.2	32.3	28.7	31.4			
Berilio	1550	1850	1825	200	59.2	203	1114	2191	2604	2823	3018	3227	3519			
Bismuto	545	9780	122	7.86	6.59	16.5	9.69	7.04								
Boro	2573	2500	1107	27.0	9.76	190	55.5	16.8	10.6	9.60	9.85					
Cadmio	594	8650	231	96.8	48.4	203	99.3	94.7								
Cinc	693	7140	389	116	41.8	117	118	111	103							
Circonio	2125	6570	278	22.7	12.4	33.2	25.2	21.6	20.7	21.6	23.7	26.0	28.8	33.0	344	344
Cromo	2118	7160	449	93.7	29.1	159	111	90.9	80.7	71.3	65.4	61.9	57.2	49.4		
Cobalto	1769	8862	421	99.2	26.6	167	122	85.4	67.4	58.2	52.1	49.3	42.5			
Cobre puro	1358	8933	385	401	117	482	413	393	379	366	352	339				
Bronce comercial (90% Cu, 10% Al)	1293	8800	420	52	14	252	356	397	417	433	451	480				

TABLA A.2 Continuación

Composición	Punto de fusión (K)	Propiedades a 300 K					Propiedades a varias temperaturas (K)									
		ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg · K)	k (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	k (W/m · K)	100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Compuesto epóxico de fibra de grafito (25% vol)	450	1400														
k , flujo de calor \parallel a las fibras				11.1		5.7	8.7	13.0								
k , flujo de calor \perp a las fibras				0.87		0.46	0.68	1.1								
c_p			935		337	642	1216									
Grafito, pirolítico	2273	2210														
k , \parallel a las capas			1950		4970	3230	1390		892	667	534	448	357	262		
k , \perp a las capas			5.70		16.8	9.23	4.09		2.68	2.01	1.60	1.34	1.08	0.81		
c_p			709		136	411	992		1406	1650	1793	1890	1974	2043		
Óxido de aluminio, zafiro	2323	3970	765	46	15.1	82	32.4	18.9	13.0	10.5						
Óxido de aluminio, policristalino	2323	3970	765	36.0	11.9	55	26.4	15.8	10.4	7.85	6.55	5.66	6.00			
Óxido de berilio	2725	3000	1030	272	88.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
						1350	1690	1865	1975	2055	2145	2750				
Pirocerámica, Granulada 9606	1623	2600	808	3.98	1.89	5.25	4.78	3.64	3.28	3.08	2.96	2.87	2.79			
						908	1038	1122	1197	1264	1498					
Nitruro de silicio	2173	2400	691	16.0	9.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
						578	778	937	1063	1155	1226	1306	1377			

^a Adaptada de las referencias 1, 2, 3, y 6.

TABLA A.3 Propiedades termofísicas de materiales comunes^a

Descripción/composición	Propiedades típicas a 300 K		
	Densidad, ρ (kg/m ³)	Conductividad térmica, k (W/m · K)	Calor específico, c_p (J/kg · K)
Materiales estructurales de construcción			
Tableros de construcción			
Tablero de asbesto-cemento	1920	0.58	—
Tablero de yeso	800	0.17	—
Madera contraplacada	545	0.12	1215
Revestimiento, densidad regular	290	0.055	1300
Teja acústica	290	0.058	1340
Madera prensada	640	0.094	1170
Madera prensada, alta densidad	1010	0.15	1380
Tablero de partículas, baja densidad	590	0.078	1300
Tablero de partículas, alta densidad	1000	0.170	1300
Maderas			
Maderas duras (roble, arce)	720	0.16	1255
Maderas suaves (abeto, pino)	510	0.12	1380
Materiales de mampostería			
Mortero de cemento	1860	0.72	780
Ladrillo, común	1920	0.72	835
Ladrillo, frente	2083	1.3	—
Teja de arcilla, hueca			
1 celda de profundidad, 10 cm de espesor	—	0.52	—
3 celdas de profundidad, 30 cm de espesor	—	0.69	—
Bloque de concreto, 3 núcleos ovales			
Arena/grava, 20 cm de espesor	—	1.0	—
Ceniza agregada, 20 cm de espesor	—	0.67	—
Bloque de concreto, núcleo rectangular			
2 núcleos, 20 cm de espesor	—	1.1	—
El mismo con núcleos llenos	—	0.60	—
Materiales de emplasto			
Emplasto de cemento, arena agregada	1860	0.72	—
Revoque de yeso, arena agregada	1680	0.22	1085
Revoque de eso, vermiculita agregada	720	0.25	—

TABLA A.3 Continuación

Descripción/composición	Propiedades típicas a 300 K		
	Densidad, ρ (kg/m ³)	Conductividad térmica, k (W/m · K)	Calor específico, c (J/kg · K)
Manta y fibra			
Fibra de vidrio, revestida de papel	16	0.046	—
	28	0.038	—
	40	0.035	—
Fibra de vidrio, recubierta; forro de tubo	32	0.038	835
Tablero y losa			
Vidrio celular	145	0.058	1000
Fibra de vidrio, unión orgánica	105	0.036	795
Poliestireno, expandido			
Estirado (R-12)	55	0.027	1210
Lechos moldeados	16	0.040	1210
Lámina de fibra mineral; material de techado	265	0.049	—
Madera, triturada/encementada	350	0.087	1590
Corcho	120	0.039	1800
Relleno suelto			
Corcho, granulado	160	0.045	—
Óxido de silicio diatómico, polvo grueso	350	0.069	—
	400	0.091	—
Óxido de silicio diatómico, polvo fino	200	0.052	—
	275	0.061	—
Fibra de vidrio, vaciado o soplado	16	0.043	835
Vermiculita, hojuelas	80	0.068	835
	160	0.063	1000
Formado/espumado de origen			
Granos de lana mineral con aglomerantes de asbestos/ orgánicos, pulverizados	190	0.046	—
Mástique de corcho de acetato polivinilo; pulverizado o fratasado	—	0.100	—
Uretano, mezcla de dos partes; espuma rígida	70	0.026	1045
Reflectivo			
Hoja de aluminio que separa capas de vidrio harinosas; 10–12 capas, al vacío; para aplicaciones criogénicas (150 K)	40	0.00016	—
Hoja de aluminio y papel de vidrio laminado; 75–150 capas; al vacío; para aplicación criogénica (150 K)	120	0.000017	—
Polvo de óxido de silicio típico, al vacío	160	0.0017	—

Tabla A.3 Continuación

Otros materiales						
Descripción/ composición	Temperatura (K)	Densidad ρ (kg/m ³)	Conductividad térmica, k (W/m · K)	Calor específico, c_p (J/kg · K)		
Asfalto	300	2115	0.062	920		
Baquelita	300	1300	1.4	1465		
Ladrillo refractario						
Carborundo	872	—	18.5	—		
	1672	—	11.0	—		
Ladrillo de cromita	473	3010	2.3	835		
	823		2.5			
	1173		2.0			
Óxido de silicio diatomáceo, refractario	478	—	0.25	—		
	1145	—	0.30			
Arcilla refractaria, cocida a 1600 K	773	2050	1.0	960		
	1073	—	1.1			
	1373	—	1.1			
Arcilla refractaria, cocida a 1725 K	773	2325	1.3	960		
	1073		1.4			
	1373		1.4			
Ladrillo de arcilla refractaria	478	2645	1.0	960		
	922		1.5			
	1478		1.8			
Magnesita	478	—	3.8	1130		
	922	—	2.8			
	1478		1.9			
Arcilla	300	1460	1.3	880		
Carbón, antracita	300	1350	0.26	1260		
Concreto (piedra mezclada)	300	2300	1.4	880		
Algodón	300	80	0.06	1300		
Productos alimenticios						
Plátano (75.7% de contenido de agua)	300	980	0.481	3350		
Manzana, roja (75% de contenido de agua)	300	840	0.513	3600		
Pan, batido	300	720	0.223	—		
Pan, completamente horneado	300	280	0.121	—		
Carne de pollo, blanca (74.4% de contenido de agua)	198	—	1.60	—		
	233	—	1.49			
	253		1.35			
	263		1.20			
	273		0.476			
	283		0.480			
	293		0.489			
Vidrio						
Plata (cal de sosa)	300	2500	1.4	750		
Pyrex	300	2225	1.4	835		

Tabla A.3 Continuación

Otros materiales (Continuación)						
Descripción/ composición	Temperatura (K)	Densidad ρ (kg/m ³)	Conductividad térmica, k (W/m · K)	Calor específico, c (J/kg · K)		
Hielo	273	920	1.88	2040		
	253	—	2.03	1945		
Cuero (suela)	300	998	0.159	—		
Papel	300	930	0.180	1340		
Parafina	300	900	0.240	2890		
Roca						
Granito, Barre	300	2630	2.79	775		
Caliza, Salem	300	2320	2.15	810		
Mármol, Halston	300	2680	2.80	830		
Cuarcita, Sioux	300	2640	5.38	1105		
Arenisca, Berea	300	2150	2.90	745		
Caucho, vulcanizado						
Suave	300	1100	0.13	2010		
Duro	300	1190	0.16	—		
Arena	300	1515	0.27	800		
Tierra vegetal	300	2050	0.52	1840		
Nieve	273	110	0.049	—		
		500	0.190	—		
Teflón	300	2200	0.35	—		
	400		0.45	—		
Tejido, humano						
Piel	300	—	0.37	—		
Capa de grasa, (adiposo)	300	—	0.2	—		
Músculo	300	—	0.41	—		
Madera, hilos cruzados						
Balsa	300	140	0.055	—		
Ciprés	300	465	0.097	—		
Abeto	300	415	0.11	2720		
Roble	300	545	0.17	2385		
Pino amarillo	300	640	0.15	2805		
Pino blanco	300	435	0.11	—		
Madera, radial						
Roble	300	545	0.19	2385		
Ciprés	300	420	0.14	2720		

^a Adaptada de las referencias 1 v 8–13

TABLA A.4 Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Aire							
100	3.5562	1.032	171.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536
Amoniaco (NH₃)							
300	0.6894	2.158	101.5	14.7	24.7	16.6	0.887
320	0.6448	2.170	109	16.9	27.2	19.4	0.870
340	0.6059	2.192	116.5	19.2	29.3	22.1	0.872
360	0.5716	2.221	124	21.7	31.6	24.9	0.872
380	0.5410	2.254	131	24.2	34.0	27.9	0.869

TABLE I-1 (Continued)

Metal	Melting Point °C	Properties at 20°C			
		ρ_s $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	C_p $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot^\circ\text{C}}$	k $\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot^\circ\text{C}}$	α $\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 10^5$
Chrome steel					
Cr = 0%		7,897	0.452	73	2.026
1%		7,865	0.46	61	1.665
5%		7,833	0.46	40	1.110
Nickel steel					
Ni = 0%		7,897	0.452	73	2.026
20%		7,933	0.46	19	0.526
Lead	328	11,373	0.130	35	2.343
Magnesium					
Pure	650	1,746	1.013	171	9.708
Mg-Al (electrolytic)					
6–8% Al, 1–2% Zn		1,810	1.00	66	3.605
Molybdenum	2,621	10,220	0.251	123	4.790
Nickel					
Pure (99.9%)	1,455	8,906	0.4459	90	2.266
Ni-Cr					
90% Ni, 10% Cr		8,666	0.444	17	0.444
80% Ni, 20% Cr		8,314	0.444	12.6	0.343
Silver					
Purest	962	10,524	0.2340	419	17.004
Pure (99.9%)		10,525	0.2340	407	16.563
Tin, pure	232	7,304	0.2265	64	3.884
Tungsten	3,387	19,350	0.1344	163	6.271
Uranium	1,133	19,070	0.116	27.6	1.25
Zinc, pure	420	7,144	0.3843	112.2	4.106

¹⁹ NECATI OZISIK; "Heat Conduction"; Second edition; JHON WILLEY & SONS. INC; USA; 1993; pag 659.

TABLE I-2 Physical Properties of Nonmetals

Material	$T, ^\circ\text{C}$	$k, \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot^\circ\text{C}}$	$\rho, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$C_p, \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot^\circ\text{C}}$	$\alpha, \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 10^7$
Asphalt	20-55	0.74-0.76			
Brick					
Building brick, common face	20	0.69 1.32	1600 2000	0.84	5.2
Carborundum brick	600 1400	18.5 11.1			
Chrome brick	200 900	2.32 1.99	3000	0.84	9.2 7.9
Diatomaceous earth, molded and fired	200 870	0.24 0.31			
Fireclay brick, burned 1330°C	500 800	1.04 1.07	2000	0.96	5.4
Clay	30	1.3	1460	0.88	—
Cement, portland	23	0.29	1500		
Coal, anthracite	30	0.26	1200-1500	1.26	
Concrete, cinder	23	0.76			
Stone 1-2-4 mix	20	1.37	1900-2300	0.88	8.2-6.8
Cotton	20	0.06	80	1.30	
Glass, window	20	0.78 (avg)	2700	0.84	3.4
Pyrex	30	1.4	2225	0.835	
Paper	30	0.011	930	1.340	
Paraffin	30	0.020	900	2.890	
Plaster, gypsum	20	0.48	1440	0.84	4.0
Rubber, vulcanized					
Soft	30	0.012	1100	2.010	
Hard	30	0.013	1190	—	
Sand	30	0.027	1515	0.800	
Stone					
Granite		1.73-3.98	2640	0.82	8-18
Limestone	100-300	1.26-1.33	2500	0.90	5.6-5.9
Marble		2.07-2.94	2500-2700	0.80	10-13.6
Sandstone	40	1.83	2160-2300	0.71	11.2-11.9
Teflon	30	0.35	2200		
Tissue, human skin	30	0.37			
Wood (across grain)					
Balsa	30	0.055	140		
Cypress	30	0.097	460		
Fir	23	0.11	420	2.72	0.96
Maple or oak	30	0.166	540	2.4	1.28
Yellow pine	23	0.147	640	2.8	0.82
White pine	30	0.112	430		

**ANEXO D: EJEMPLO DEL USO DEL COMSOL
MODELADO EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS
COMSOL 4.0**

MODELADO EN ESTADO ESTABLE.

Antes de abrir el programa de modelado COMSOL, se procede a construir en el programa adecuado el equipo a estudiar en formato igs.

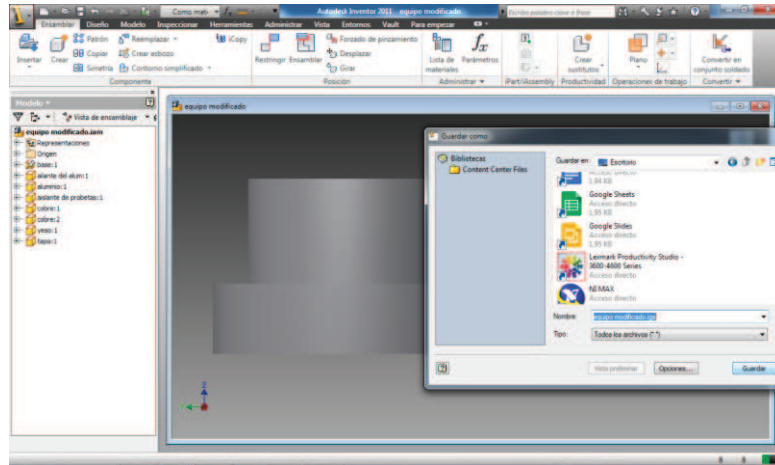


Figura 1: Equipo construido en inventor y guardado en el formato igs.

Fuente: Propia

Se abre el programa COMSOL.

Se selecciona 3D, luego clic izquierdo en el mouse en la flecha como se indica en la figura 2

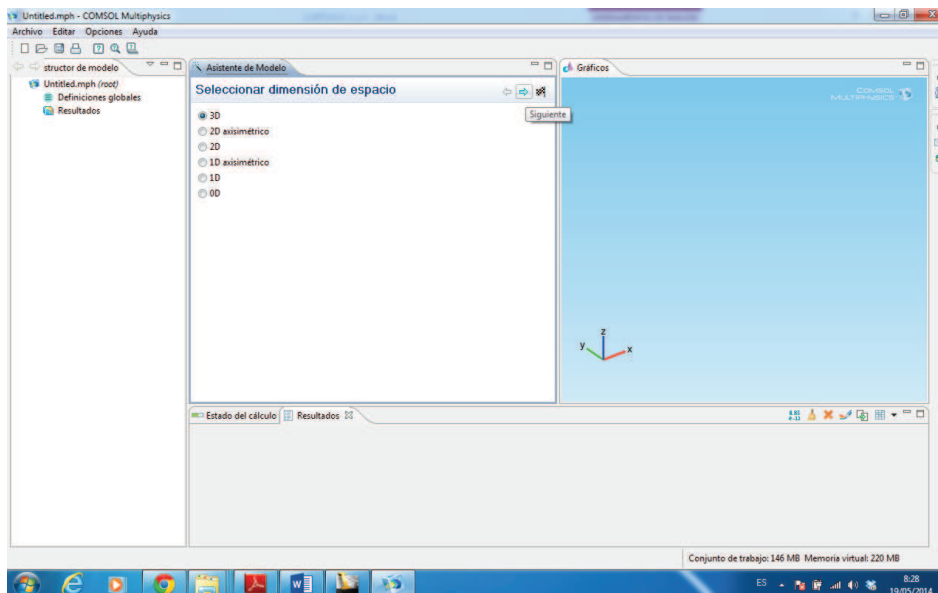


Figura 2: Selección para hacer la simulación en 3 dimensiones

Fuente: Propia

Seleccionar el tipo de transferencia de calor que desee, puede ser transferencia de calor en sólidos (ht), añadir seleccionado y clic izquierdo en la flecha continuar azul.

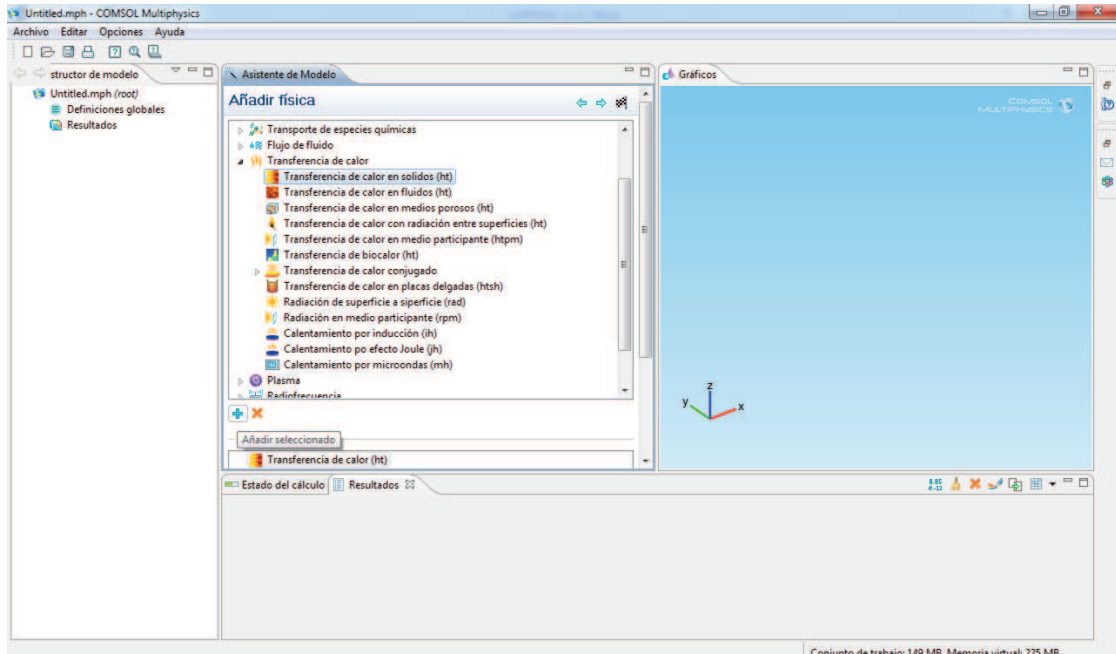


Figura 3: Selección del tipo de transferencia de calor.

Fuente: Propia

Elegir estacionario y terminar.

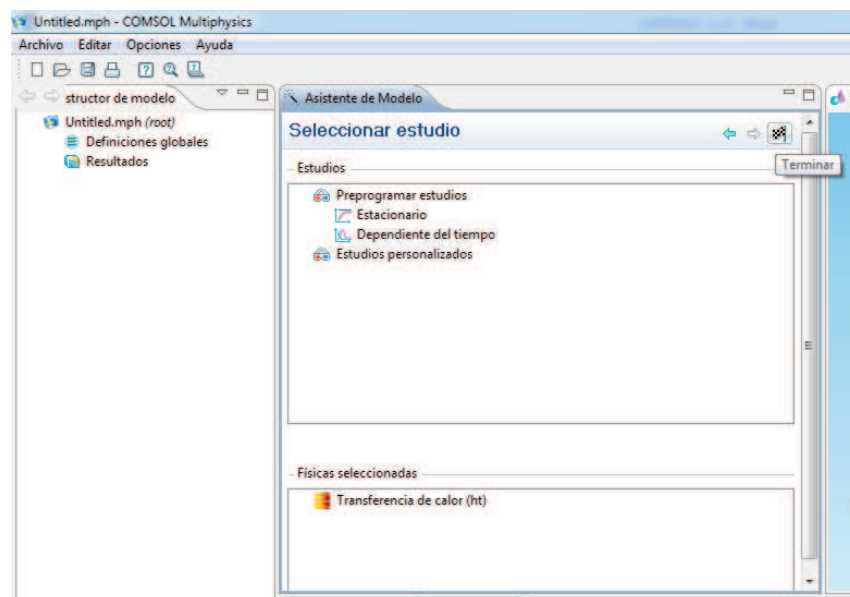


Figura 4: Análisis estacionario.

Fuente: Propia

Se puede simular en distintas unidades, como se indica en la figura

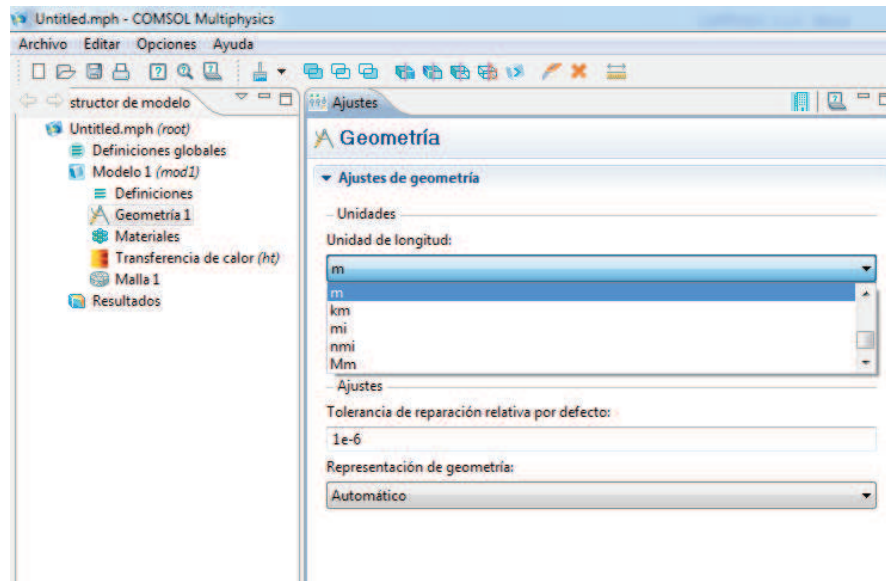


Figura 5: Sistema usado para el análisis.

Fuente: Propia

Clic derecho en geometría, elegir importar para navegar, abrir el archivo igs e importar al COMSOL.

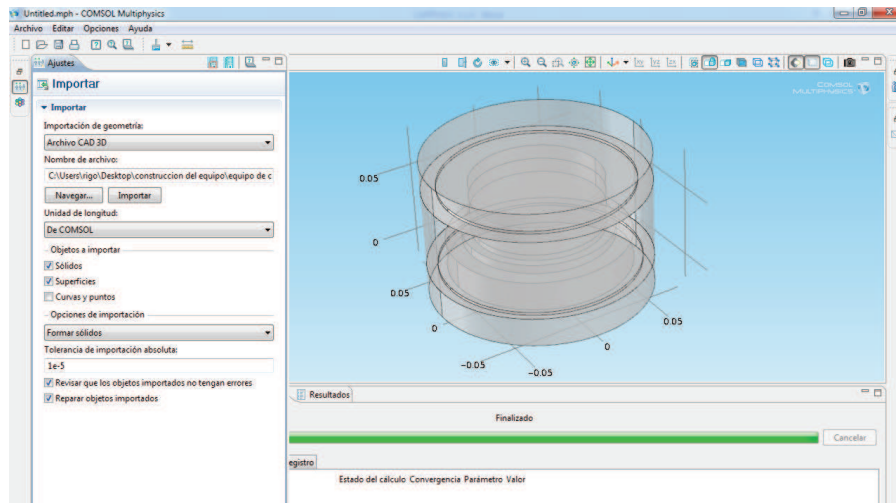


Figura 6: Geometría del equipo.

Fuente: Propia

Clic derecho en materiales y seleccionar de la biblioteca los materiales a usar o personalizar cada uno.

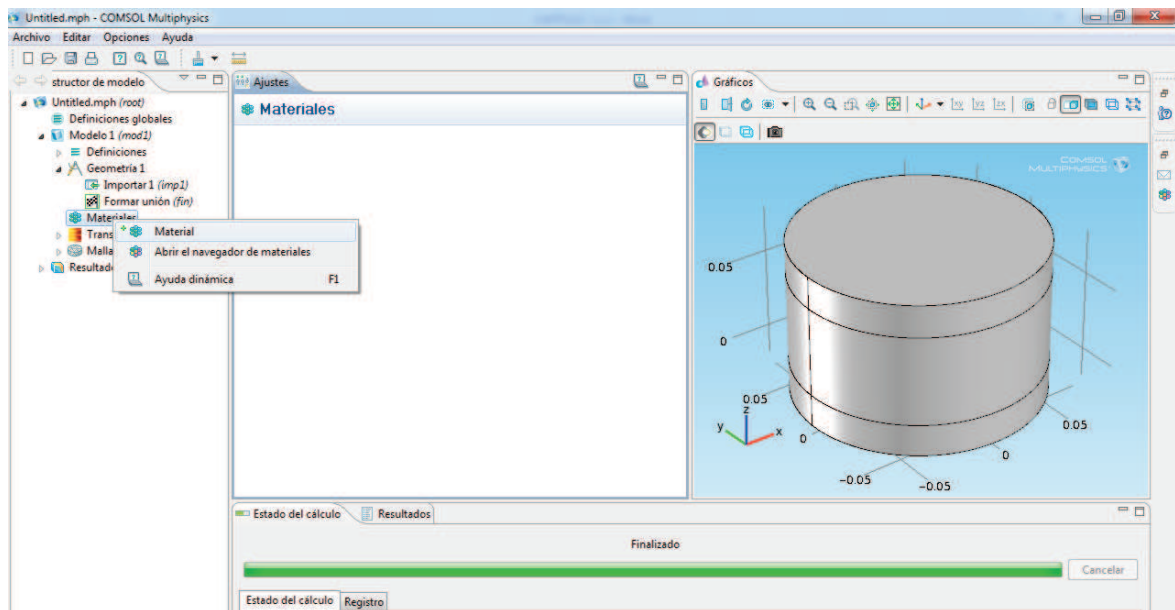


Figura 7: Material de las partes del equipo.

Fuente: Propia

Clic derecho en materiales y seleccionar de la biblioteca

Usar el material y características correspondientes como densidad, conductividad termica y capacidad calorifica.

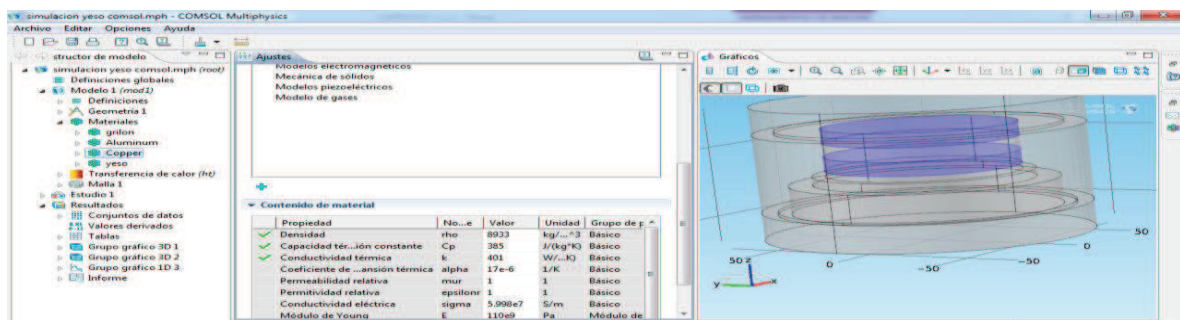


Figura 8: Propiedades de los materiales del equipo.

Fuente: Propia

La opción transferencia de calor, usar temperaturas como parámetros iniciales y de borde en los lugares adecuador del equipo.

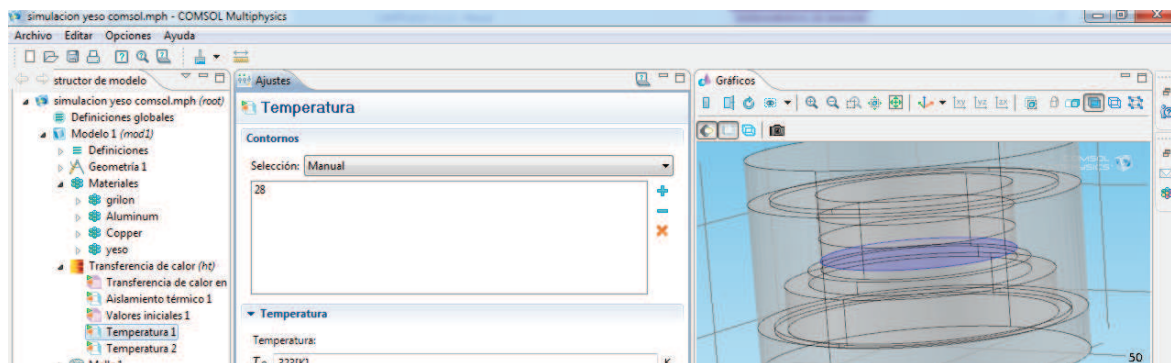


Figura 9: Temperatura en las superficies del equipo.

Fuente: Propia

Se va a seleccionar un tipo de mallado para el análisis de elemento finito, para nuestro fin se usa el tetraédrico libre.

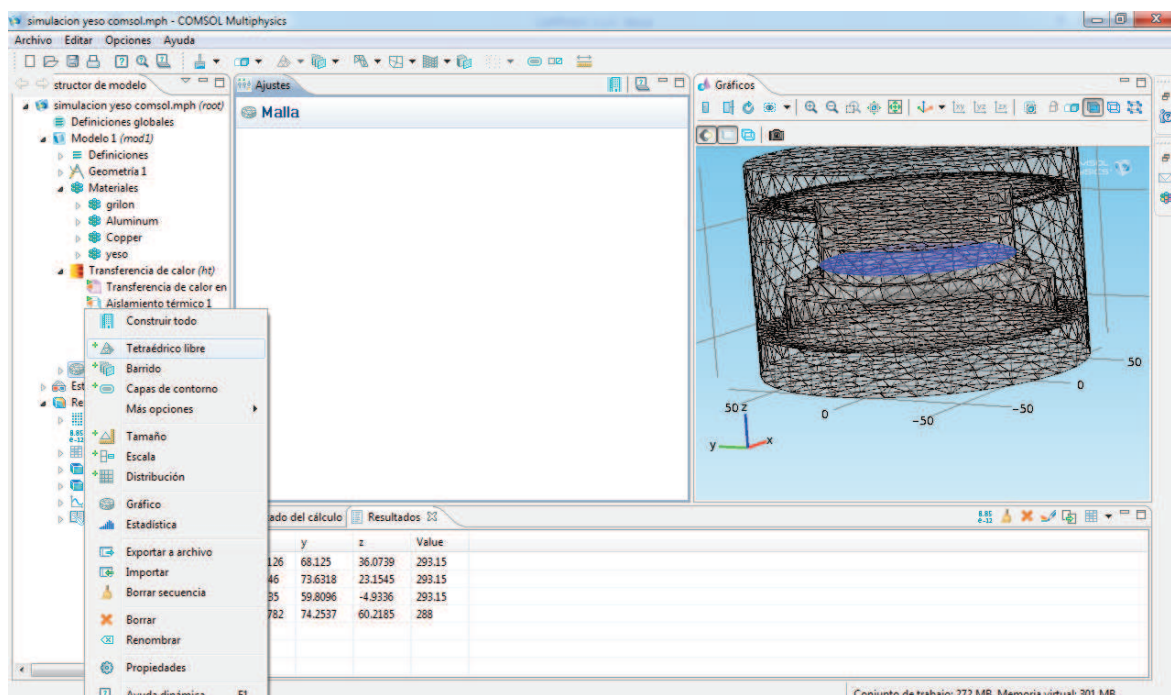


Figura 10: Mallado.

Fuente: Propia

En el icono estudio se elige insertar el grafico 1 D, en este se selecciona el tipo de grafico(lineal), se pone calcular y se espera el tiempo necesario par que se realice la operación de simulacion. Hasta que aparecen los graficos en 3D y 1D.

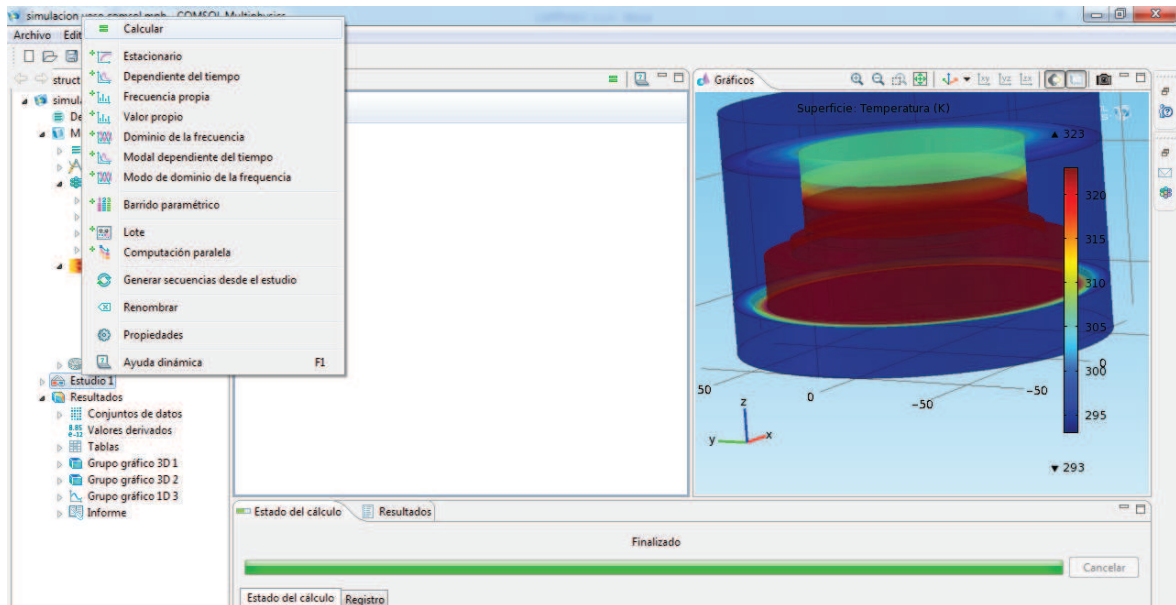


Figura 11: Estudio de la simulación.

Fuente: Propia

Si se desea exportar los datos a una tabla de excel se debe enviar los mismos al informe y desde ahí exportar a la carpeta que desee, para luego ser abierta en el programa excel. Se navega en la carpeta que va a ser ubicado el archivo, se nombra y guarda. Luego se procede a poner click en exportar. Finalmente guardar este archivo.

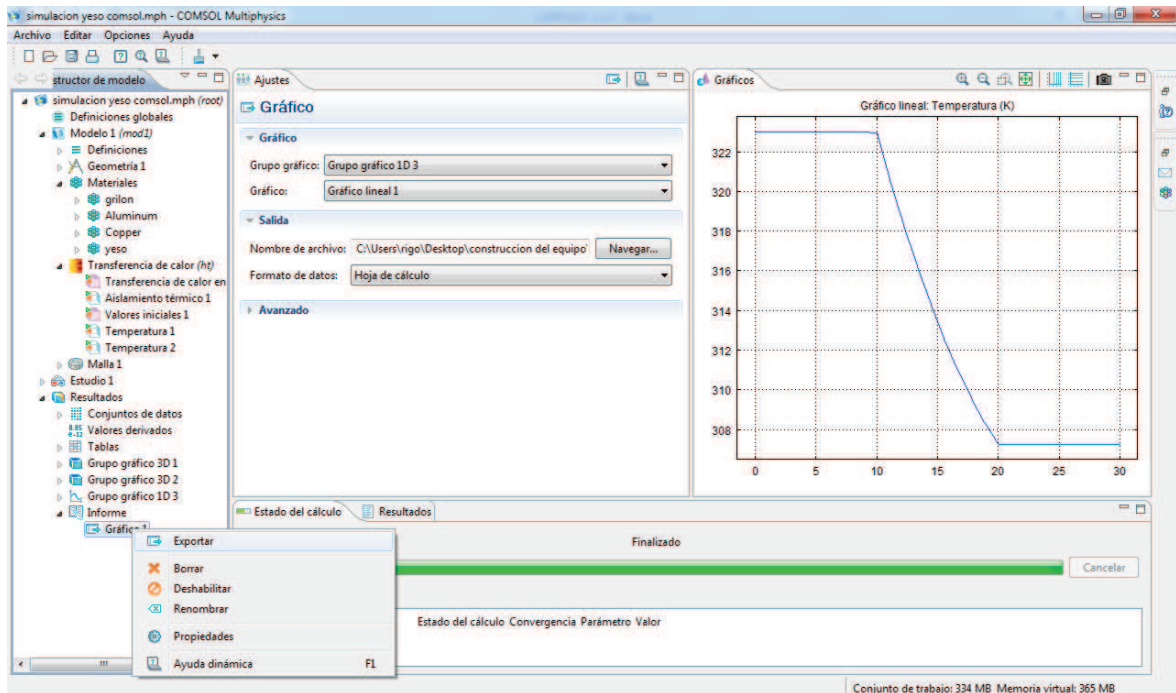


Figura 12: Exportar datos desde Comsol.

Fuente: Propia

Al abrir excel se procede a ir a Datos, desde texto, seleccionamos el archivo guardado en texto desde el COMSOL, aceptar, ancho fijo, en formato de columnas avanzada y se cambia los puntos por comas y las comas por puntos y se continua hasta que los datos aparezcan en excel, y se grafica estos con el procedimiento habitual en el mismo.

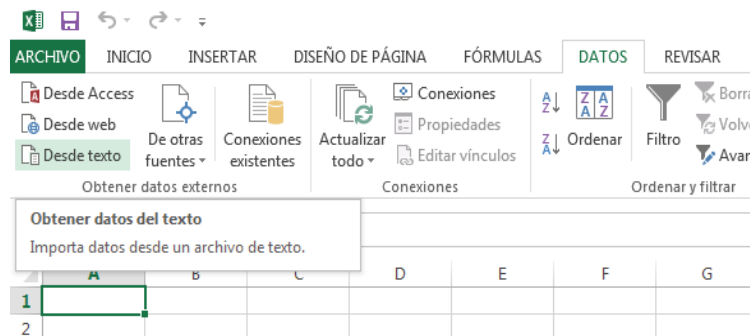


Figura 13: Exportar datos a Excel.

Fuente: Propia

Quedando en un grafico los datos de la simulacion.

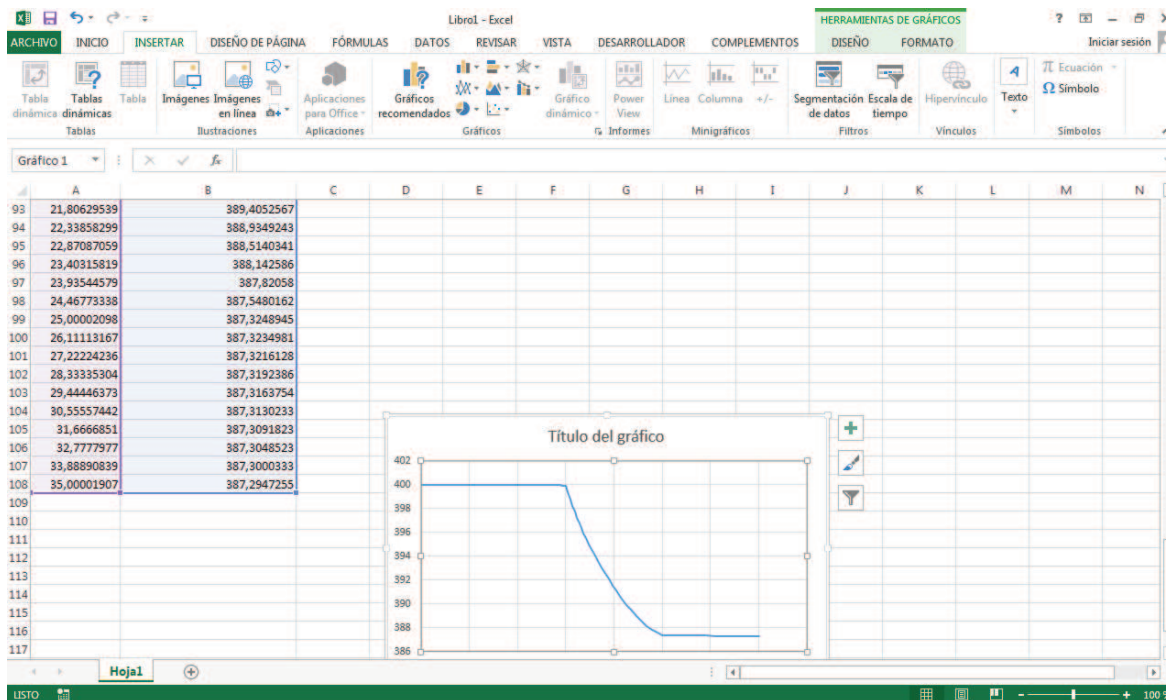


Figura 14: Datos Exportados a Excel.

Fuente: Propia

ANEXO E: EJEMPLO DEL USO DEL WOLFRAM MATEMÁTICA.

RESOLUCIÓN DEL UNA ECUACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO PARA EL EQUIPO DE CONDUCCIÓN DE CALOR.

Abrir el programa Wolfram matemática.

En la opción file, seleccionar new notebook.

Ubicar en este el código con la ecuación diferencial a resolver con NDSolve o DSolve para ecuaciones con números complejos/reales y solo reales, respectivamente, como se indica a continuación.

Se define una función Temp1

```
Temp1 == DSolve[{940.69 * T'[t] == 484 - (147.44 * (T[t] - 323)) - 0.00781 *
(T[t] - 273) - 0.00878 * (T[t] - 273), T[0] == 293}, T[t], t]
```

En el caso de usar la opción NDSolve, no se puede ver la ecuación resultante, cuando la ecuación está resuelta para los reales, cuando aparece:

$$\{\{y \rightarrow \text{InterpolatingFunction}[\{\{0., t.\}\}, " \langle \rangle "]\}\}$$

Con la opción shift enter se resuelve directamente la ecuación diferencial .

```
Temp1 == {{T[t]
→ 326.2766965518462 e-0.15675364891728413t (-0.10198919169993025
+ 1. e0.15675364891728413t)}}
```

Si se desea plotear estos resultados, con el comando plot se lo puede efectuar, en esta sección se ubica las axeslabel y axesorigin. Se ubica el tiempo inicial de la toma de datos y el final, también la temperatura inicial de trabajo.

```
Plot[{326.2766965518462 e-0.15675364891728413t (-0.10198919169993025
+ 1. e0.15675364891728413t), 292.11 + 0.0086t - 0.00009t2
+ 2.999999999999999 × 10-8t3}, {t, 0, 40}, AxesLabel
→ {tiempo[s], temperatura[K], AxesOrigin → 0, 0}, PlotLegends
→ Automatic]
```

Con la opción shift enter se muestra el plot.

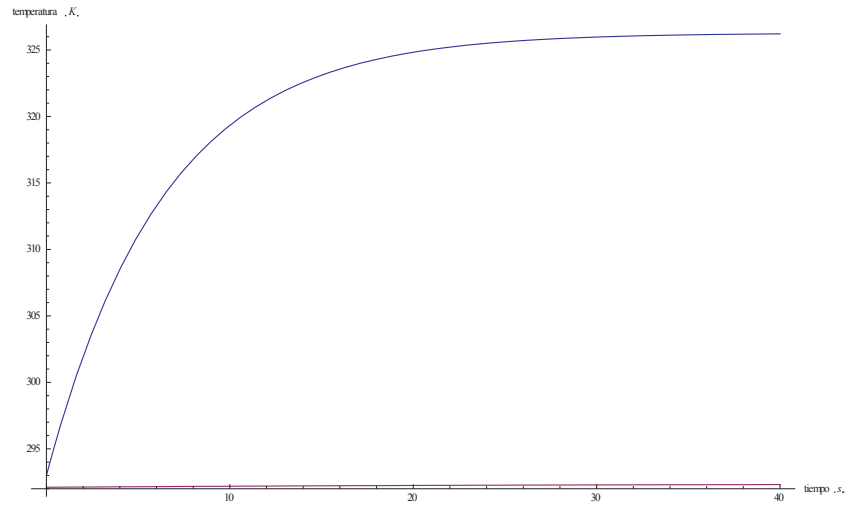


Figura 1: Plot de la ecuación estado transitorio.

Fuente: Propia

ANEXO F: EJEMPLO DEL PROGRAMA LABVIEW

USO DEL LABVIEW

Abrir el programa labview.

Enchufar el equipo a la corriente de la empresa electrica, ubicar el master on/off en on.

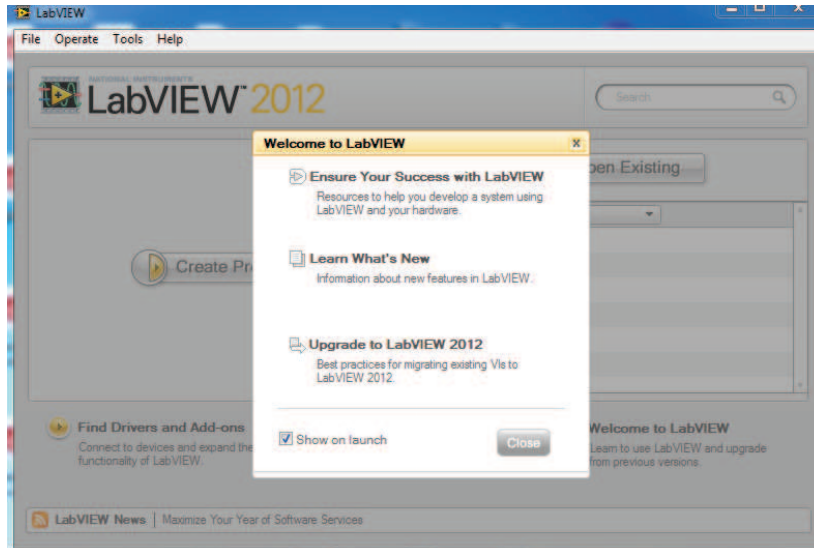


Figura 1: Abrir el programa Labview.

Fuente: Propia

Abrir el archivo Temperatura ya elaborado.

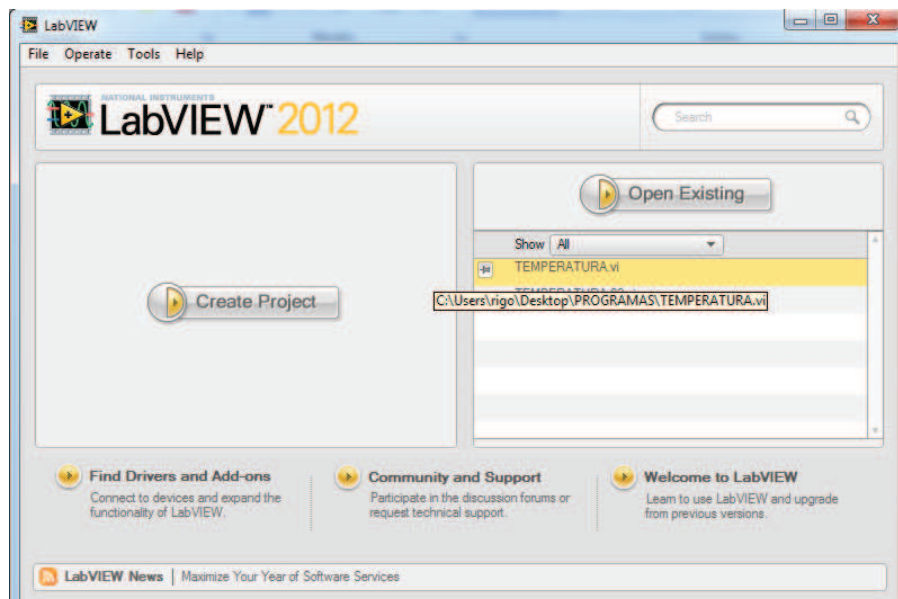


Figura 2: Abrir el programa elaborado.

Fuente: Propia

Conectar el dispositivo Arduino a la computadora, por medio de un cable USB.
 Enlazar el arduino con el labview por medio del puerto com correspondiente al Arduino.

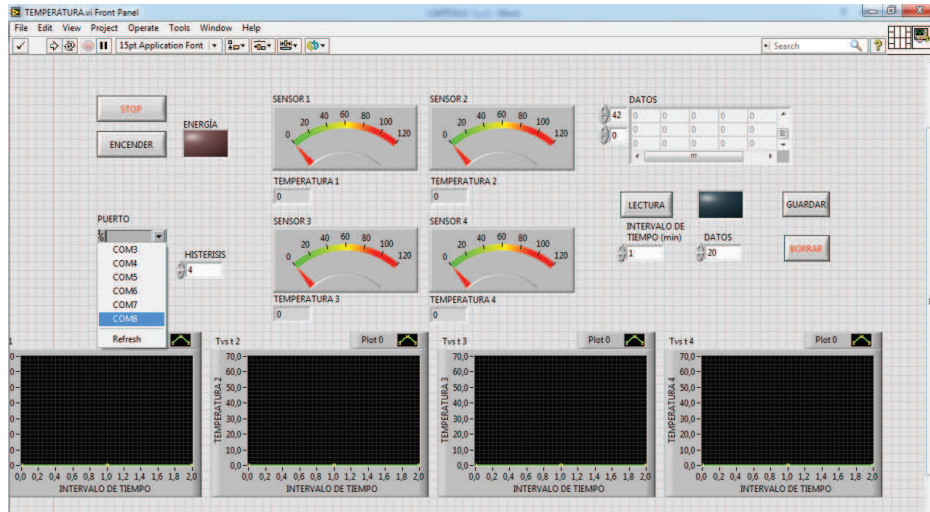


Figura 3: Vista del panel de control de Labview.

Fuente: Propia

Ejecutar la opción run.

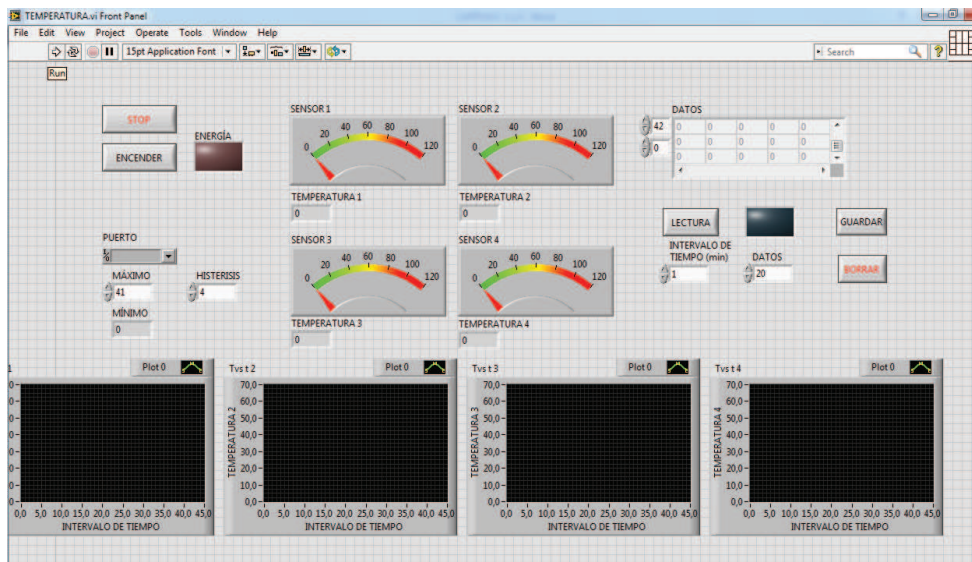


Figura 4: Correr el programa Labview.

Fuente: Propia

Desde el programa en labview encender la resistencia y poner en marcha la toma de datos(lectura).

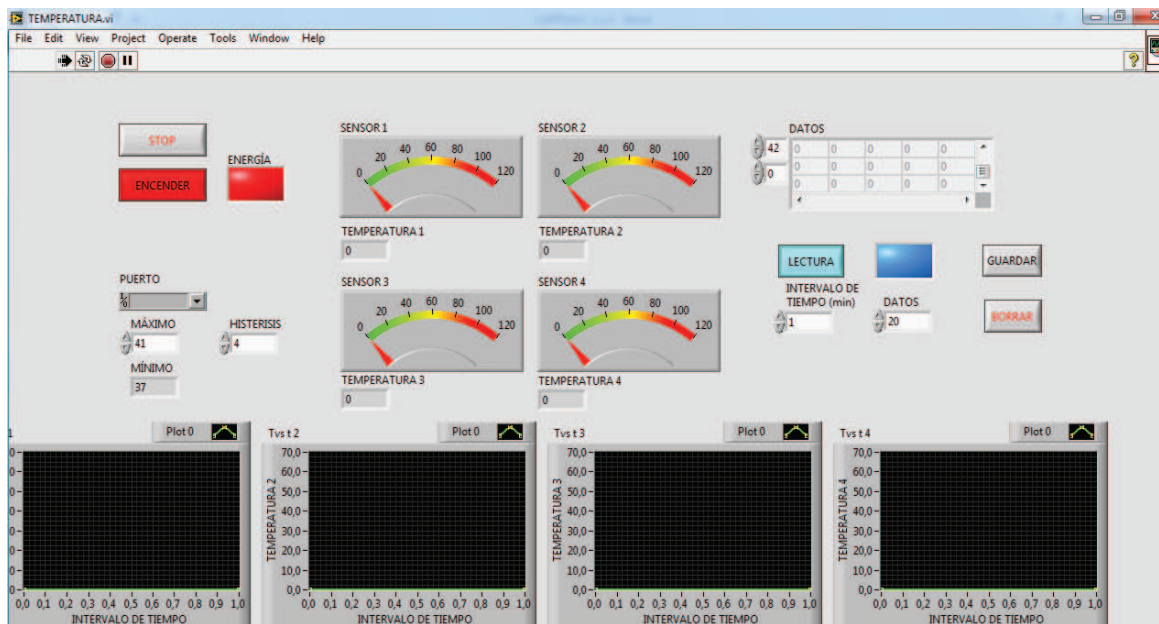



Figura 5: Encendido de la resistencia.

Fuente: Propia

Si desea guardar los datos, existe la opción guardar estos en una hoja de texto para luego ser abierto en excel y realizar la gráfica correspondiente.

ANEXO G: NORMA ASTM C518.2004

 C 518 - 04

3.3.13 T_h —temperature of the hot plate surface, K .

3.3.14 T_c —temperature of the cold plate surface, K .

3.4 Subscripts:

3.4.1 h —hot.

3.4.2 c —cold

3.4.3 a , b —first and second specimen.

3.4.4 m —mean.

3.4.5 α —statistical term used to define significance level.

4. Significance and Use

4.1 This test method provides a rapid means of determining the steady-state thermal transmission properties of thermal insulations and other materials with a high level of accuracy when the apparatus has been calibrated appropriately.

4.2 Proper calibration of the heat flow meter apparatus requires that it be calibrated using specimen(s) having thermal transmission properties determined previously by Test Methods C 177, or C 1114.

NOTE 1—Calibration of the apparatus typically requires specimens that are similar to the types of materials, thermal conductances, thicknesses, mean temperatures, and temperature gradients as expected for the test specimens.

4.3 The thermal transmission properties of specimens of a given material or product may vary due to variability of the composition of the material; be affected by moisture or other conditions; change with time; change with mean temperature and temperature difference; and depend upon the prior thermal history. It must be recognized, therefore, that the selection of typical values of thermal transmission properties representative of a material in a particular application should be based on a consideration of these factors and will not apply necessarily without modification to all service conditions.

4.3.1 As an example, this test method provides that the thermal properties shall be obtained on specimens that do not contain any free moisture although in service such conditions may not be realized. Even more basic is the dependence of the thermal properties on variables, such as mean temperature and temperature difference. These dependencies should be measured or the test made at conditions typical of use.

4.4 Special care shall be taken in the measurement procedure for specimens exhibiting appreciable inhomogeneities, anisotropies, rigidity, or especially high or low resistance to heat flow (see Practice C 1045). The use of a heat flow meter apparatus when there are thermal bridges present in the specimen may yield very unreliable results. If the thermal bridge is present and parallel to the heat flow the results obtained may well have no meaning. Special considerations also are necessary when the measurements are conducted at either high or low temperatures, in ambient pressures above or below atmospheric pressure, or in special ambient gases that are inert or hazardous.

4.5 The determination of the accuracy of the method for any given test is a function of the apparatus design, of the related instrumentation, and of the type of specimens under test (see Section 10), but this test method is capable of determining thermal transmission properties within $\pm 2\%$ of those determined by Test Method C 177 when the ambient temperature is near the mean temperature of the test ($T(\text{ambient}) = T(\text{mean})$

$\pm 1^\circ\text{C}$), and in the range of 10 to 40°C . In all cases the accuracy of the heat flow meter apparatus can never be better than the accuracy of the primary standards used to calibrate the apparatus.

4.5.1 When this test method is to be used for certification testing of products, the apparatus shall have the capabilities required in A1.7 and one of the following procedures shall be followed:

4.5.1.1 The apparatus shall have its calibration checked within 24 h before or after a certification test using either secondary transfer standards traceable to, or calibration standards whose values have been established by, a recognized national standards laboratory not more than five years prior to the certification date. The average of two calibrations shall be used as the calibration factor and the specimen(s) certified with this average value. When the change in calibration factor is greater than 1%, the standard specimen shall be retested and a new average calculated. If the change in calibration factor is still greater than 1% the apparatus shall be calibrated using the procedure in Section 6.

4.5.1.2 Where both the short and long term stability of the apparatus have been proven to be better than 1% of the reading (see Section 10), the apparatus may be calibrated at less frequent intervals, not exceeding 30 days. The specimens so tested cannot be certified until after the calibration test following the test and then only if the change in calibration factor from the previous calibration test is less than 1%. When the change in calibration is greater than 1%, test results from this interval shall be considered void and the tests repeated in accordance with 4.5.1.1.

4.5.2 The precision (repeatability) of measurements made by the heat flow meter apparatus calibrated as in Section 6.6 normally are much better than $\pm 1\%$ of the mean value. This precision is required to identify changes in calibration and is desirable in quality control applications.

5. Apparatus

5.1 The construction guidelines given in this section should be understood by the user of this test method. While it is mandatory that these details be followed carefully when constructing an apparatus, it behooves the user to verify that the equipment is built as specified. Serious errors of measurement may result from this oversight.

5.2 General:

5.2.1 The general features of a heat flow meter apparatus with the specimen or the specimens installed are described in Section 6 and shown in Figs. 1-3. A heat flow meter apparatus consists of two isothermal plate assemblies, one or more heat flux transducers and equipment to control the environmental conditions when needed. Each configuration will yield equivalent results if used within the limitations stated in this test



FIG. 1 Apparatus with One Heat Flux Transducer and One Specimen

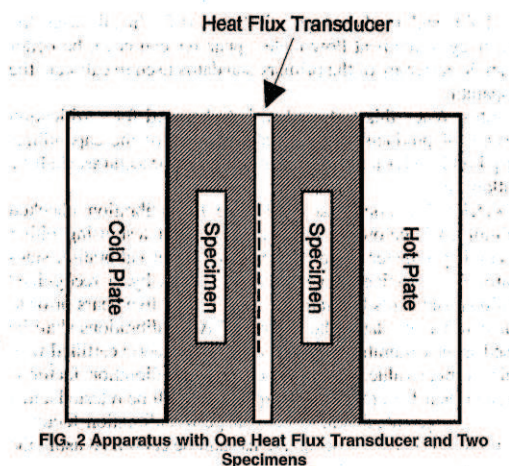


FIG. 2 Apparatus with One Heat Flux Transducer and Two Specimens

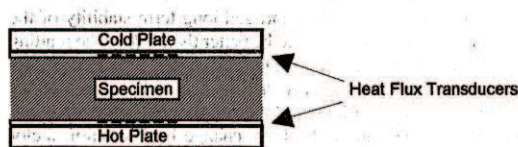


FIG. 3 Apparatus with Two Heat Flux Transducers and One Specimen

method. There are distinct advantages for each configuration in practice and these are discussed in Appendix X2.

NOTE 2—Further information can be found in ISO 8301:1991, which is the equivalent ISO standard for the Heat Flow Meter Apparatus.

5.2.2 Further design considerations, such as plate surface treatment, flatness and parallelism, temperature requirements and measuring system requirements can be found in Annex A1.

6. Calibration

6.1 The calibration of a heat flow meter apparatus is a very critical operation. Since lateral heat losses or gains of heat are not controlled or eliminated automatically, but only lessened by increasing the size of the guard area and edge insulation, there is no guarantee that the heat losses or gains are negligible under all testing conditions. To ensure that the equipment is performing properly with specimens of different thermal resistances, the apparatus shall be calibrated with materials having similar thermal characteristics and thicknesses as the materials to be evaluated. The apparatus shall be calibrated with the specimen in the same orientation and the heat flux in the same direction under which the primary, CTS or SRM, or secondary transfer standards were characterized, if known. The material selected for the calibration standard shall have properties that are not affected by convection over the range of calibration parameters (temperature difference, thickness, density, and so forth) of interest. The apparatus shall be calibrated as a unit, with the heat flux transducer(s) installed in the apparatus.

6.2 This procedure applies to the calibration of a heat flow meter apparatus over a wide range of heat flow rates and

temperatures, which permits the testing of a wide variety of insulation materials over an extended temperature range.

6.3 The following calibration procedure is used to compute the calibration factor, S for a heat flow meter apparatus, and must be used by anyone who desires to produce meaningful heat flux measurements from a heat flow apparatus.

6.4 Calibration Standards:

6.4.1 Calibration standards may be good for many years if handled carefully but shall be checked periodically to confirm lack of change.

6.4.2 It is recommended that the primary standards obtained from a national standards laboratory should not be used on a daily basis, but secondary, or working standards should be produced. Create a record on the secondary standards with the following information.

- 6.4.2.1 Name of national laboratory to which it is traceable.
- 6.4.2.2 Date the secondary standard is produced.
- 6.4.2.3 Date the secondary standard is last tested.
- 6.4.2.4 Direction of heat flux during calibration.
- 6.4.2.5 Thermal value of the secondary standard.
- 6.4.2.6 Range of parameters for which it is valid.
- 6.4.2.7 Estimate of bias of the primary and secondary standards.

6.5 Calibration Procedure:


6.5.1 Calibrate the heat flow meter apparatus under the same conditions of plate temperatures, temperature gradient, specimen thickness, heat flow direction, and apparatus orientation as those for which data are available for the standard.

6.5.2 *Single Temperature Point*—If the calibration standard is tested at a single mean temperature, conduct the calibration and subsequent tests near the same mean temperature. Use engineering judgment or an error analysis to determine how closely the mean temperature must be maintained. As assessment of the sensitivity of the calibration standard to test conditions should be determined by the user of the transfer standard to determine its limitations of use.

6.5.3 *Multiple Temperature Points*—If the calibration standard is tested at three or more mean temperatures, calibrate the heat flow meter apparatus at the same temperatures using the same temperature gradients (11). A smooth curve can be fitted to the points such that a calibration factor can be interpolated for any given mean temperature. It is not permissible to extrapolate above or below the mean temperature range of the calibration standard measurements. Changing the plate temperature of a heat flow meter apparatus has the potential of changing apparatus calibration. When changing plate temperatures, take steps to determine if the heat flux transducer calibration factor has changed.

6.5.4 *Single Thickness Point*—If the original calibration standard is tested at only one thickness, the heat flow meter apparatus can be calibrated for that thickness without an exhaustive thickness study. If tests are to be conducted at thicknesses other than the calibrated thickness, make a thorough study of the error of the heat flow meter apparatus at other thicknesses. Several references on this subject are listed at the end of this test method (4, 11-15, 17, 26, 27).

6.5.5 *Multiple Thickness Points*—If the original standard is tested at three or more thicknesses, the heat flow meter

 C 518 - 04

apparatus can be calibrated over the same thickness range. A smooth curve can be fitted to the points such that a calibration factor can be interpolated for any given thickness. If tests are to be conducted at thicknesses above or below the calibrated thicknesses, make a thorough study of the error of the heat flow meter apparatus at these thicknesses.

6.6 Calibration of Various Designs:

6.6.1 There are several configurations of heat flow meter apparatuses that use one or two heat flux transducers and one or two specimens in the apparatus. While it is not practical to list all of the possible combinations of apparatus and specimen configurations, this section contains the equations for calculating the calibration factor of three common apparatuses. The calibration and testing configuration should be identical. The calibration factor of a heat flow meter apparatus is determined by running the same standard specimens a number of times, not consecutively, but over a period of time with the standard removed each time.

6.6.2 *One Calibration Standard*—Apparatus with one heat flux transducer and one standard (see Fig. 1).

$$S = C \cdot (T_h - T_c) / E \quad (1)$$

6.6.3 *Two Calibration Standards*—Apparatus with one heat flux transducer and one specimen configuration (same as that for 6.6.2).

6.6.3.1 The two calibration standards need to be the same thickness and of similar material but need not be identical. With the following equation, it is not necessary to know the thermal conductance of each calibration standard, but it is necessary to know the average thermal conductance of the two standards:

$$S = \frac{C_a + C_b}{\left(\frac{E_a}{(T_{ha} - T_{ca})} + \frac{E_b}{(T_{hb} - T_{cb})} \right)} \quad (2)$$

6.6.3.2 *Two Calibration Standards*—Apparatus with one heat flux transducer and two specimens (see Fig. 2).

6.6.3.3 Again, the standards need to be the same thickness and of similar material but not necessarily identical.

$$S = \frac{C_a + C_b}{E \cdot \left(\frac{1}{(T_{ha} - T_{ca})} + \frac{1}{(T_{hb} - T_{cb})} \right)} \quad (3)$$

6.6.4 *One Calibration Standard*—Apparatus with two heat flux transducers and one specimen (see Fig. 3).

6.6.4.1 Assuming the two transducers physically are identical and have similar outputs, one can sum the outputs of the two transducers and then calibrate as a single transducer apparatus. In this case, it is very important to keep the mean temperature and the plate temperatures equal to those used in testing the standard. It is essential that each of the transducers be at steady state.

$$S = \frac{C \cdot (T_h - T_c)}{(E1 + E2)} \quad (4)$$

6.6.4.2 In the case where multiple transducers are used, a similar calculation can be utilized to calculate the calibration factor.

6.6.4.3 As an alternative, each heat flux transducer can be calibrated as an independent apparatus as in 6.6.1.

7. Test Procedures

7.1 *Foreword on Testing Procedures*—The relative simplicity of this test method may lead one to overlook very important factors, which may affect the results. To ensure accurate measurement, the operator shall be instructed fully in the operation of the equipment. Furthermore, the equipment shall be calibrated properly with reference materials having similar heat transfer characteristics. Also it is necessary that the specimen be prepared properly for evaluation.

7.2 Sampling and Preparation of Specimens:

7.2.1 *Test Specimens*—One- or two-piece specimens may be used, depending on the configuration selected for the test. Where two pieces are used, they shall be selected from the same material to be essentially identical in construction, thickness, and density. For loose fill materials, the method specified in the material specification or in Practice C 687 shall be used to produce a specimen or specimens of the desired density.

7.2.2 *Selection of Specimens*—The specimen or specimens shall be of such size as to cover the plate assembly surfaces and shall either be of the actual thickness to be applied in use or of sufficient thickness to give a true average representation of the material to be tested. If sufficient material is not available, the specimen shall at least cover the metering area, and the rest of the plate surfaces must be covered with a mask with a thermal conductivity as close to that of the specimen as possible.


7.3 *Specimen Conditioning*—Details of the specimen selection and conditioning preferably are given in the material specification. Where such specifications are not given, the specimen preparation shall be conducted in accordance with the requirement that materials shall not be exposed to temperatures that will change the specimens in an irreversible manner. Typically, the material specifications call for specimen conditioning at 22°C (72°F) and 50 % R.H. for a period of time until less than a 1 % mass change is observed over a 24-h period. For some materials, such as cellulose, considerably longer times may be required for both conditioning and testing.

7.4 Specimen Preparation:

7.4.1 Use the following guidelines when the material specification is unavailable. In general, the surfaces of the specimen should be prepared to ensure that they are parallel with and have uniform thermal contact with the hot and cold plates.

7.4.2 *Compressible Specimens*—The surfaces of the uncompressed specimens may be comparatively uneven so long as surface undulations are removed under test compression. It may be necessary to smooth the specimen surfaces to achieve better plate-to-specimen contact. If the apparent thermal conductivity of the contact void is greater than that of the specimen, compressible or otherwise, the measured heat flux will be greater than the heat flux that would be obtained if the voids were absent. This may often be the case at higher temperatures where radiant heat transfer predominates in the void. For the measurement of compressible specimens, the temperature sensors are often mounted directly in the plate surfaces. Also, plate spacers may be required for the measurement of compressible specimens.

7.4.3 *Rigid and High Conductance Specimens*—The measurement of rigid specimens or high conductance specimens


C 518 – 04

requires careful surface preparation. First, the surfaces should be made flat and parallel to the same degree as the heat-flow-meter. If the specimen has a thermal resistance that is sufficiently high compared to the specimen-to-plate interface resistance, temperature sensors mounted in the plates may be adequate.

7.5. Measurements on Specimens:

7.5.1 Blanket and Batt-Type Materials—When specified, the test thickness of blankets and batt-type materials shall be determined before testing in accordance with Test Methods C 167, provided that good contact is maintained between the specimen and the isothermal plates. Also, it is recommended highly that the thickness during the actual test be measured. At the conclusion of the test, the density in the metering area should be determined.

7.5.2 Loose-fill Materials—These materials generally are tested in open test frames as spelled out in Practice C 687. The requirement to measure the density in the metering area is again critical.

7.6. Limitations on Specimen Thickness:

7.6.1 General—The combined thickness of the specimen or specimens, the heat flux transducer and any damping material, which in total equals the distance between the cold and hot plates, must be restricted in order to limit the effect of edge losses on the measurements. In addition edge losses are affected by the edge insulation and the ambient temperature, so the requirements on both of these parameters must be met.

7.6.2 Maximum Spacing Between Hot and Cold Plates—The maximum allowable distance between the hot and cold plates during a test, is related to the dimensions of the heat flux transducer, the metering area, the size of the plate assembly, the construction of the heat meter apparatus, and the properties of the specimen. No suitable theoretical analysis is available to predict the maximum allowable thickness of specimens. It is possible to use the results of an analysis for a similarly sized guarded hot plate as a guide (10, 16-18).

7.7. Procedure of Measurement:

7.7.1 Temperature Difference—For any test, make the temperature difference across the specimen not less than 10 K. For specimens that are expected to have a large thermal resistance, a larger temperature difference in the specimen is recommended (see Practice C 1058 for the selection of the plate temperatures). The actual temperature difference or gradient is best specified in the material specifications or by agreement of the parties concerned.

7.7.2 Edge Insulation—Enclose the edges of the specimens with thermal insulation to reduce edge heat losses to an acceptable level if this edge insulation is not built into the apparatus (see A1.6).

7.7.3 Settling Time and Measurement Interval—Verify the existence of thermal equilibrium by observing and recording the emf output of the heat flux transducer, the mean temperature of the specimens, the temperature drop across the specimen, and a calculated λ value. Make observations at time intervals of at least 10 min until five successive observations yield values of thermal conductivity, which fall within ½ % of the mean value for these five readings. If the five readings show a monotonically increasing or decreasing trend, equilib-

rium has not been attained. In this case, additional sets of readings shall be taken. If experience has shown that a shorter time interval may be used, follow the same criteria for stability. For high density specimens ($\rho > 40 \text{ kg/m}^3$) or for low conductance specimens ($C < 0.05 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$) the time between readings may have to be increased to 30 min or longer (19).

8. Calculation

8.1. Density and Change in Mass—When required, calculate the density of the dry specimen as tested, ρ , the mass change due to conditioning of the material, and the mass change of the specimen during test.

8.1.1 Density of Batt and Blanket Specimens—It has been found that it is important to measure the mass of the specimens in contact with the metering area. The area of the specimen directly measured shall be cut out and its mass determined after testing, unless the specimen must be retained for further testing.

8.2 Thermal Properties for One Specimen—When only one specimen is used, calculate the thermal conductance of the specimen as follows:

$$C = S \cdot E / \Delta T \quad (5)$$

and where applicable, calculate the thermal conductivity, as follows:

$$\lambda = S \cdot E \cdot (L / \Delta T) \quad (6)$$

8.3 Thermal Properties for Two Specimens—When two specimens are used, calculate the total thermal conductance, C , as follows:

$$C = S \cdot E / (\Delta T_a + \Delta T_b) \quad (7)$$

The λ factor, that is, the average thermal conductivity of the specimen is calculated as follows:

$$\lambda_{me} = (S \cdot E / 2) \cdot (L_a + L_b) / (\Delta T_a + \Delta T_b) \quad (8)$$

where the subscripts refer to the two specimens.

8.4 Other derived thermal properties may be calculated but only under the provisions given in Practice C 1045.

8.5 Thermal Properties for Two Transducers—All pertinent equations of 8.2 and 8.3 apply to this configuration, provided $S \cdot E$ will be replaced by $(S' \cdot E' + S'' \cdot E'') / 2$, where the superscripts ' and '' refer to the first and second heat flux transducer, respectively.

9. Report

9.1 The report of the results of each test shall include the following information with all data to be reported in both SI and inch-pound units unless specified otherwise.

9.1.1 The report shall be identified with a unique numbering system to allow traceability back to the individual measurements taken during the test performed.

9.1.2 Name and any other pertinent identification of the material including a physical description.

9.1.3 Description of the specimen and its relationship to the sample, including a brief history of the specimen, if known.

9.1.4 Thickness of the specimen as received and as tested.

9.1.5 Method and environment used for conditioning, if used.

9.1.6 Density of the conditioned specimen as tested, kg/m^3 .

ANEXO H: PLANOS

ANEXO I: GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

TEMA: conducción de calor en materiales no metálicos.

OBJETIVO: Determinar el coeficiente experimental de transferencia de calor por conducción en no metales.

TEORÍA:

TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

La conducción es un proceso mediante el cual fluye el calor desde una región de temperatura alta a una región de temperatura baja dentro de un medio (sólido, líquido, gaseosos) o entre medios diferentes en contacto físico directo. En el flujo de calor por conducción, la energía se transmite por comunicación molecular directa sin desplazamiento apreciable de las moléculas. De acuerdo con la teoría cinética, la temperatura de un elemento de materia, es proporcional a la energía cinética media de su constituyente molecular. La energía que posee un elemento de materia debido a la velocidad y a la posición relativa de las moléculas, recibe el nombre de energía interna. Por lo tanto para un elemento dado de materia, mientras más rápidamente se muevan sus moléculas, mayor será su temperatura y su energía interna. Cuando las moléculas de una región adquieren una energía cinética media mayor que la de las moléculas de una región adyacente, lo que se manifiesta por una diferencia de temperatura, las moléculas que poseen mayor energía transmitirán parte de ella a las moléculas de la región a más baja temperatura.

La conducción es el único mecanismo por el cual puede fluir calor en sólidos opacos. La conducción es también importante en fluidos, pero en medios no sólidos esta generalmente combinada con la convección en algunos casos también con la radiación.

Fourier estableció que la rapidez del flujo de calor por conducción (q_k) en un material, es igual al producto de las siguientes cantidades.

$$q_k = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.1)$$

Donde:

q_k = tasa de transferencia de calor (W)

k = conductividad térmica del material (W/m.K)

A = área normal a la dirección del flujo de calor (m^2)

$\frac{\partial T}{\partial x}$ = gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor.

La conductividad térmica k es una propiedad del material e indica la cantidad de calor que fluirá a través de un área unitaria si el gradiente de temperatura es la unidad.

COMPONENTES DEL EQUIPO:

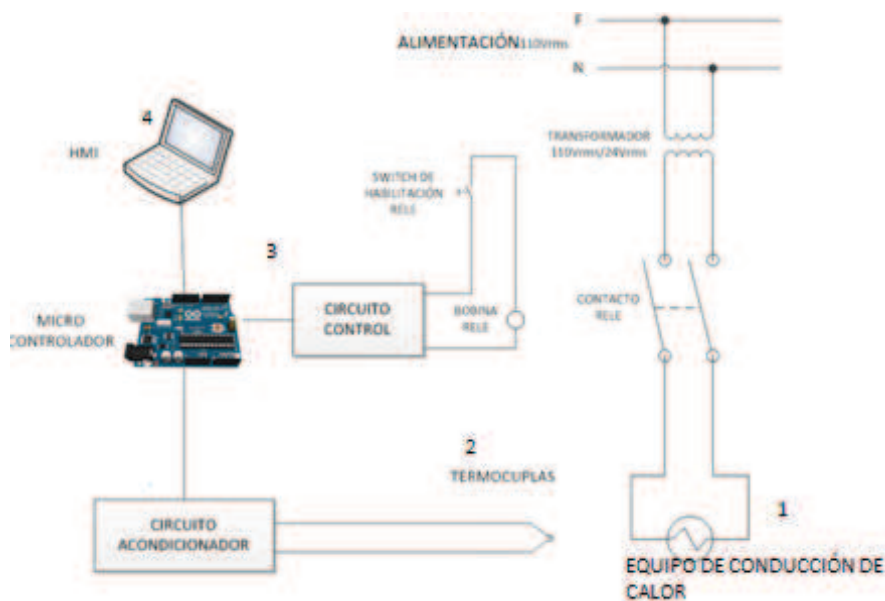


FIGURA 1 EQUIPO COMPLETO DE CONDUCCION DE CALOR

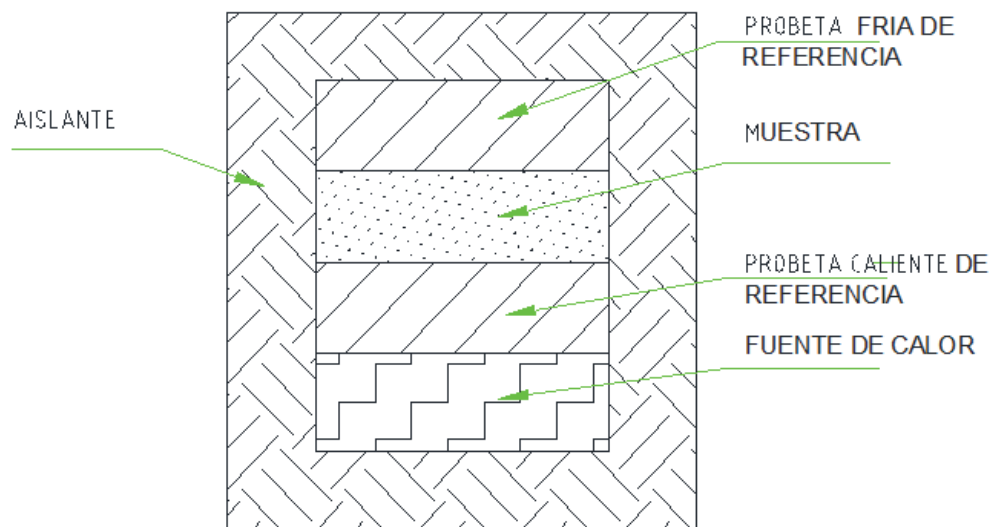


FIGURA 2: EQUIPO DE CONDUCCION DE CALOR.

PROCEDIMIENTO:

1. Acoplar las probetas dentro del equipo.
2. Poner la tapa aislante sobre las placas de prueba.
3. Poner las termocuplas en los orificios correspondientes.
4. Conectar el cable a La fuente de poder de la Empresa Eléctrica a 110 voltios.
5. Enlazar mediante un cable USB entre la computadora y el micro controlador (Arduino).
6. Abrir el programa Labview correspondiente.
7. Poner en on la perilla de encendido y apagado de la resistencia.

8. Comunicar el Arduino con el programa Labview mediante el puerto com correspondiente.
9. Correr el programa Labview Temperatura.
10. Encender la resistencia eléctrica por medio del programa ya mencionado.
11. Poner en marcha la lectura de datos, por al menos 1 hora, tiempo en el cual se estabilizan las temperaturas superficiales.
12. Guardar los datos obtenidos.
13. Poner en stop el paso de corriente eléctrica a la resistencia.
14. Detener el programa Labview.
15. Poner off la perilla de encendido y apagado de la resistencia
16. Desconectar el cable USB de la computadora.
17. Desconectar el equipo de la fuente de 110 voltios.
18. Finalmente se deja enfriar el equipo de conducción de calor hasta la temperatura ambiente.

CÁLCULOS:

1. Determinación del coeficiente experimental de conducción de calor del no metal analizado.

Se considera un sistema aislado en el cual está el elemento de muestra y los elementos de referencia, como se puede apreciar en la figura

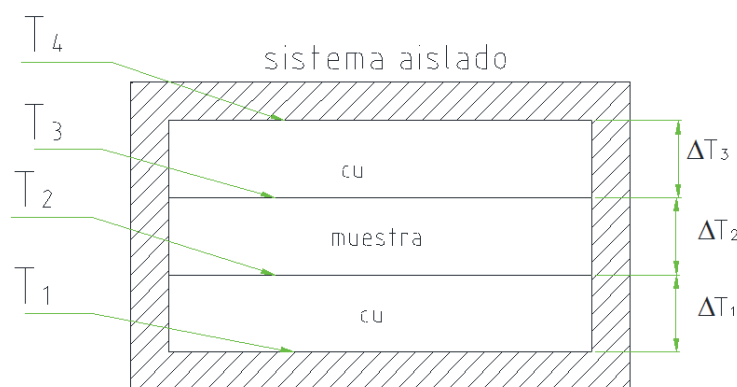


Figura 3: Sistema aislado de la muestra y referencias

Fuente: propia.

Al hacer el balance de energía para los elementos que están en conducción se tiene el coeficiente de conducción de calor de la muestra en función de coeficiente

de conducción de calor de referencia y de la variación de temperaturas en cada bloque. Las áreas de contacto se consideran iguales, las cuales se las suprime. Coeficiente de conducción de la referencia y de los espesores se los considera constantes:

Entonces:

$$q_1 = q_2 = q_3 \quad 1$$

Al reemplazar la ecuación 2.34 en función de la temperatura se logra:

$$P_e = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_1}{k_{cu}A} + \frac{L_2}{k_M A} + \frac{L_3}{k_{cu}A}} \quad 2$$

Los espesores de las probetas son iguales ($L_1=L_2=L_3$), al igual que el área. Se supone constante la constante de la placa de referencia.

Despejando k_m de la ecuación 2.34 se obtiene:

$$k_m = \frac{P_e * L_2 * k_{cu}}{k_{cu} * A * \Delta T_2 - 2P_e * L} \quad 3$$

La potencia eléctrica que se suministra equivale al calor que se intercambia entre las placas, por medio de la conducción unidimensional e igual a la energía potencial eléctrica o diferencia de potencial (voltaje) en voltios por la intensidad de corriente (amperios) que pasa por el sistema.

$$q_s = P_e = WI = \frac{W^2}{Re} \quad 4$$

NOMENCLATURA:

A= área entre las superficies en contacto (m^2).

I= intensidad de corriente (Amp)

Km= coeficiente de conducción de calor de la muestra (W/mK).

Kcu= coeficiente de conducción de calor de la placa testigo de cobre (W/mK).

L= espesor de cada una de las probetas (m).

Pe= potencia eléctrica (w)

q_s = calor entrante al sistema (w).

R_e = resistencia eléctrica (Ω)

ΔT_2 = diferencia de temperaturas entre la placa caliente y la placa fría de referencia.

W = voltaje (v)

INFORME:

- Resumen de la teoría(máximo 3 hojas)
- Elabore un cuadro de datos.
- Determinar el coeficiente experimental de conductividad térmica del no metal.
- Consultar el coeficiente de conducción térmica teórico para cada uno de los no metales más usados.
- Comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los datos obtenidos de tablas.
- Compare y analice el error generado, por causa del equipo electrónico.
- Simular el comportamiento de la temperatura en función del espesor en un programa de simulación (sugerencia usar Comsol).
- Analizar los datos obtenidos de la simulación y del experimento.
- Conclusiones y recomendaciones (personales).
- Bibliografía.

NOTA: Hacer el reconocimiento del equipo antes de la práctica.