

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA EL ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN SUPERFICIES EXTENDIDAS EN ESTADO ESTABLE, DESTINADO AL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

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

**JUAN CARLOS ALMACHI NACIMBA**

juancarloslokill095415600@hotmail.com

**JAIRO ANDRÉS PILLIZA ORMAZA**

andres\_jairomecanica@hotmail.es

**Director: MSC. ÁNGEL PORTILLA**

angel.portilla@epn.edu.ec

**Codirector: MSC. RICARDO SOTO**

ricardo.soto@epn.edu.ec

**Quito, Octubre 2013**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Juan Carlos Almachi Nacimba y Jairo Andrés Pilliza Ormaza, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación personal; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

---

**Juan Carlos Almachi Nacimba**

---

**Jairo Andrés Pilliza Ormaza**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Juan Carlos Almachi Nacimba y Jairo Andrés Pilliza Ormaza, bajo la supervisión.

**Ing. ÁNGEL PORTILLA**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

---

**Ing. RICARDO SOTO**  
**CODIRECTOR DEL PROYECTO**

---

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, יהוה, por habernos mostrado bondad amorosa habiéndonos dado la vida, la salud y las fuerzas suficientes para culminar nuestro proyecto.

Un agradecimiento especial al ing. Ángel Portilla, director de tesis, por habernos, brindado de su apoyo incondicional, tiempo y dedicación que hicieron posible que esta tesis se realice.

Al Ing. Ricardo Soto, por comprendernos y brindarnos ayuda incondicional en los momentos más difíciles de nuestra carrera.

A nuestra querida universidad Escuela Politécnica Nacional institución que no solo nos brindó de su conocimiento sino que también la oportunidad de tener un sitio de trabajo durante la realización de la tesis.

A nuestros queridos amigos del Machachi United Fc.y Lolitorio del Fauno, por su apoyo sincero en cada una de las facetas como estudiantes.

**Juan Carlos Almachi Nacimba**  
**Jairo Andrés Pilliza Ormaza**



## DEDICATORIA

A mi madre, Elsa María Nacimba Loya, quien me ha enseñado que hay que ser siempre honesto aunque a veces la vida nos pague con mal.

A mi padre, Pablo Enrique Almachi Flores, quien me ha dado el ejemplo de ser valiente y seguir los sueños sin importar desde donde se tenga que comenzar.

A mis hermanas, Josselyn y Viviana, por cuidarme como su hermano menor a pesar de ser el mayor de todos.

A mi amiga, Priscila Abigail Egas Moya, por enseñarme a valorar la vida y por hacerme ver que tengo un propósito para el futuro.

**Juan Carlos Almachi Nacimba**

A mi madre, María del Carmen, que con su amor y ternura ha sido fuente de inspiración para alcanzar mis metas.

A mi hermano, Rodrigo Pilliza, que con su ejemplo y apoyo ha sabido cuidarme y hacer de mi un hombre de bien.

A mi hermana, María Belén, a quien amo con todo mi corazón.

A mis tíos Fabián Pilliza y Ruth Riofrío que siempre han sabido aconsejarme para tomar decisiones acertadas y su esfuerzo incansable por alcanzar sus sueños me sirve de aliento en mi vida.

A toda esa gente linda que sueña con un mejor futuro y todos los días se esfuerza incansablemente por conseguirlos.

**Jairo Andrés Pilliza Ormaza**

## Índice general

CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1  DEFINICIONES GENERALES.....	1
1.1.1  CALOR.....	1
1.1.2  TEMPERATURA.....	2
1.1.3  DIFERENCIA ENTRE TEMPERATURA Y CALOR.....	2
1.1.4  TRANSFERENCIA DE CALOR.....	2
1.1.5  TIPOS O MECANISMOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR..	3
1.1.5.1  Conducción.....	3
1.1.5.1.1  Conductividad térmica.....	4
1.1.5.2  Convección.....	6
1.1.5.3  Convección libre o natural.....	7
1.1.5.4  Convección forzada.....	8
1.1.5.5  Radiación.....	9
1.1.6  OTROS FACTORES.....	10
1.1.6.1  Característica estructural.....	10
1.1.6.2  Medio.....	10
CAPÍTULO II.....	11
GENERALIDADES DE LA CONDUCCIÓN DE CALOR UNIDIMENSIONAL EN ESTADO ESTABLE.....	11
2.1  CONDUCCIÓN DE CALOR.....	11
2.2  CONDUCCIÓN DE CALOR UNIDIMENSIONAL.....	12
2.2.1  RESISTENCIA TÉRMICA DE CONTACTO.....	15
2.3  SUPERFICIES EXTENDIDAS.....	16
2.4  APLICACIONES DE LAS SUPERFICIES EXTENDIDAS.....	17
2.5  TIPOS DE SUPERFICIES EXTENDIDAS.....	19
2.5.1  ALETAS LONGITUDINALES.....	19
2.5.2  ALETAS RADIALES O TRANSVERSALES.....	20
2.5.3  ESPINAS.....	21
2.6  ECUACIÓN GENERAL PARA ALETAS LONGITUDINALES DE SECCIÓN TRASVERSAL CONSTANTE.....	21
2.7  ECUACIÓN GENERAL PARA ALETAS LONGITUDINALES DE SECCIÓN TRASVERSAL VARIABLE.....	25
2.8  EFICIENCIA DE LAS ALETAS.....	28
2.8.1  RESISTENCIA TÉRMICA DE LAS ALETAS.....	28

CAPÍTULO III.....	30
DISEÑO DEL EQUIPO Y SIMULACIÓN DE LAS ALETAS .....	30
3.1  DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO .....	30
3.2  POTENCIA REQUERIDA .....	31
3.2.1  CONSIDERACIONES QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA.....	31
3.2.1.1  Dimensiones de la fuente de calor .....	32
3.2.1.2  Dimensiones de las aletas .....	32
3.2.1.3  Temperatura máxima superficial .....	32
3.2.1.4  Recubrimientos de la fuente de calor .....	33
3.2.1.5  Temperatura de los alrededores .....	33
3.2.1.6  Coeficiente de convección .....	33
3.2.1.6.1  Consideraciones para el cálculo del coeficiente de convección.....	33
3.2.1.6.2  Cálculo del coeficiente de convección.....	33
3.2.2  Calculo de la potencia requerida en las aletas.....	35
3.2.2.1  Aleta de aluminio de sección circular constante .....	35
3.2.2.2  Aleta de acero de sección circular constante .....	36
3.2.2.3  Aleta triangular de acero .....	36
3.3  TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN DE LAS ALETAS .....	37
3.3.1  TEMPERATURA DE LOS ALREDEDORES.....	38
3.3.2  TEMPERATURA INICIAL DE LAS SUPERFICIES .....	38
3.3.3  MATERIALES QUE ALMACENAN ENERGÍA .....	38
3.3.4  BALANCE ENERGÉTICO EN ESTADO TRANSITORIO DE LOS DIFERENTES TIPO DE ALETAS.....	38
3.3.4.1  Balance energético, aleta de aluminio de sección circular constante.....	38
3.3.4.2  Balance energético, aleta de acero de sección circular constante.....	39
3.3.4.3  Balance energético, aleta triangular de acero .....	39
3.4  POTENCIA REQUERIDA EN LA PLACA FUENTE DE CALOR.....	41
3.4.1  CÁLCULO DE POTENCIA EN LA PLACA FUENTE.....	42
3.4.2  Selección del cartucho calefactor .....	43
3.4.3  Ajuste del cartucho calefactor .....	45
3.4.4  Conexión de los cartuchos.....	45
3.5  SIMULACIÓN DE LAS ALETAS .....	46
3.5.1  SIMULACIÓN Y OBTENCIÓN DE DATOS, ALETA DE ALUMINIO DE SECCIÓN CIRCULAR CONSTANTE .....	46

3.5.2	SIMULACIÓN Y OBTENCIÓN DE DATOS, ALETA DE ACERO DE SECCIÓN CIRCULAR CONSTANTE .....	48
3.5.3	SIMULACIÓN Y OBTENCIÓN DE DATOS, ALETA DE ACERO TRIANGULAR .....	49
3.6	PROGRAMACIÓN EN LABVIEW .....	50
3.6.1	ESTRUCTURA DE FUNCIONAMIENTO .....	51
3.6.2	SELECCIÓN DE LA TERMOCUPLA .....	52
3.6.3	SELECCIÓN DEL ADQUISIDOR DE DATOS .....	54
3.6.4	CIRCUITO DE ACOPLAMIENTO .....	54
3.6.5	INTERFAZ DE PRESENTACIÓN .....	55
CAPÍTULO IV.....		56
CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL EQUIPO .....		56
4.1	CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO .....	56
4.2	DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES Y ACTIVIDADES A REALIZAR .....	59
4.2.1	ESCRITORIO .....	59
4.2.2	ESTRUCTURA .....	60
4.2.3	PLACA FUENTE DE CALOR .....	61
4.2.4	ALETAS DE SECCIÓN CIRCULAR CONSTANTE.....	63
4.2.5	ALTEA TRIANGULAR DE ACERO.....	64
4.3	ACOPLAMIENTO DE LOS CARTUCHOS CALEFACTORES CON LA PLACA FUENTE DE CALOR .....	64
4.4	CIRCUITO DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	65
4.5	CIRCUITO DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	67
CAPÍTULO V.....		69
PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		69
5.1	PRUEBAS.....	69
5.1.1	ACONDICIONAMIENTO DEL REGISTRO DE DATOS .....	69
5.1.1.1	Análisis de los datos obtenidos .....	71
5.1.2	PRUEBAS PARA LA ALETA DE ACERO TIPO TRIANGULAR... ..	73
5.1.2.1	Procedimiento experimental.....	73
5.1.2.2	Mediciones obtenidas para la aleta de acero tipo triangular ..	74
5.1.2.2.1	Curvas de distribución y eficiencia de la aleta de acero tipo Triangular .....	75
5.1.2.2.2	Análisis de resultados .....	75
5.1.2.3	Mediciones obtenidas para la aleta de acero de sección circular constante .....	76
5.1.2.3.1	Curvas de distribución y eficiencia de la aleta de acero de sección circular constate .....	77

5.1.2.3.2	Análisis de resultados .....	77
5.1.2.4	Mediciones obtenidas para la aleta de aluminio de sección circular constante .....	78
5.1.2.4.1	Curvas de distribución y eficiencia de la aleta de aluminio de sección circular constante .....	79
5.1.2.4.2	Análisis de resultados .....	79
CAPÍTULO VI.....		81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		81
6.1	CONCLUSIONES .....	81
6.2	RECOMENDACIONES .....	83
BIBLIOGRAFÍA .....		84
ANEXOS .....		86
ANEXO A: ECUACIÓN DE BESSEL GENERALIZADA .....		87
ANEXO B: PROPIEDADES DE CERAMIC FIBER BOARDS ANS SHAPES .		90
ANEXO C: PROPIEDADES DEL AIRE A DIFERENTES TEMPERATURAS .		93
ANEXO D: PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL ALUMINIO Y ACERO A DIFERENTES TEMPERATURAS.....		94
ANEXO E: PROGRAMACIÓN EN WOLFRAM MATHEMATICA .....		96
ANEXO F: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CARTUCHO CALEFACTOR .....		104
ANEXO G. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....		109
ANEXO H: ESPECIFICACIONES DE LAS TERMOCUPLAS.....		118
ANEXO I: TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI USB 6009.....		120
ANEXO J: PROGRAMACIÓN EN LABVIEW.....		124
ANEXO K: PLANOS DEL EQUIPO .....		141
ANEXO L: ESPECIFICACIONES AD 595 .....		142
ANEXO M: GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO .....		148

## Índice de tablas

### Capítulo I

Tabla 1.1 Conductividad térmica a 273.15 K .....	5
Tabla 1.2 Valores del coeficiente de transferencia de calor por convección ...	9
Tabla 1.3 Emisividad para distintas superficies.....	10

### Capítulo III

Tabla 3.1 Tamaño para cartuchos calefactores .....	44
Tabla 3.2 Tipos de termocuplas .....	52
Tabla 3.3 Análisis de alternativas para la selección de la termocupla .....	53

### Capítulo IV

Tabla 4.1 Elementos del equipo .....	56
Tabla 4.2 Materiales e insumos requeridos .....	58

### Capítulo V

Tabla 5.1 Acondicionamiento de la termocupla .....	69
Tabla 5.2 Muestreo de las termocuplas.....	71
Tabla 5.3 Muestreo de temperatura con termocuplas acondicionadas .....	72
Tabla 5.4 Datos para la aleta triangular de acero .....	74
Tabla 5.5 Porcentaje de error, aleta triangular de acero.....	74
Tabla 5.6 Datos para la aleta de sección circular constante de acero .....	76
Tabla 5.7 Porcentajes de error, aleta circular de acero .....	76
Tabla 5.8 Datos para la aleta circular de sección constante de aluminio .....	78
Tabla 5.9 Porcentaje de error, aleta circular de aluminio.....	78

## Índice de figuras

### Capítulo I

Figura 1.1 Flujo de calor .....	1
Figura 1.2 Diferencia entre calor y temperatura .....	2
Figura 1.3 Conducción de calor .....	4
Figura 1.4 Conductividad térmica del aluminio y oro, simulación en COMSOL 4.0 .....	5
Figura 1.5 Transferencia de calor por convección desde una placa .....	6
Figura 1.6 Convección forzada .....	8

### Capítulo II

Figura 2. 1 Perfil de temperatura.....	12
Figura 2. 2 Conducción de calor unidireccional .....	13
Figura 2. 3 Conducción estacionaria unidimensional .....	14
Figura 2. 4 Transferencia de calor unidimensional, serie, paralelo .....	14
Figura 2. 5 Resistencia de contacto .....	15
Figura 2. 6 Conducción y convección combinadas en un elemento estructural .....	16
Figura 2. 7 Aplicaciones de las superficies extendidas.....	18
Figura 2. 8 Colocación de aletas .....	19
Figura 2. 9 Aletas longitudinales .....	19
Figura 2. 10 Aletas radiales.....	20
Figura 2. 11 Tipos de espinas .....	21
Figura 2. 12 Aletas de sección transversal constante .....	22
Figura 2. 13 Aletas de sección transversal variable .....	25
Figura 2. 14 Resistencia de una aleta .....	28

### Capítulo III

Figura 3. 1 Equipo para el laboratorio de transferencia de calor .....	31
Figura 3. 2 Secuencia de funcionamiento del equipo .....	31
Figura 3. 3 Dimensiones de las aletas .....	32
Figura 3. 4 Diagrama de resistencias térmicas.....	35
Figura 3. 5 Tiempo de estabilización de las aletas .....	40
Figura 3. 6 Tiempo de estabilización para diferentes potencias .....	41
Figura 3. 7 Simulación con diferentes potencias .....	43
Figura 3. 8 Partes de un cartucho .....	44
Figura 3. 9 Curvas para el ajuste de los cartuchos.....	45
Figura 3. 10 Vista frontal, aleta de aluminio, simulación COMSOL 4.0.....	46
Figura 3. 11 Aleta de aluminio, simulación en COMSOL 4.0 .....	47
Figura 3. 12 Distribución de temperaturas aleta circular de aluminio.....	47
Figura 3. 13 Vista lateral, aleta de acero, simulación en CONSOL 4.0.....	48
Figura 3. 14 Aleta de acero, simulación en COMSOL 4.0 .....	48
Figura 3. 15 Distribución de temperatura, aleta circular de acero.....	48
Figura 3. 16 Vista lateral, aleta triangular de acero, simulación en COMSOL 4.0.....	49

Figura 3. 17 Aleta triangular de acero, simulación en COMSOL 4.0.....	49
Figura 3. 18 Distribución de temperatura, aleta triangular de acero .....	49
Figura 3. 19 Curvas de distribución de temperaturas .....	50
Figura 3. 20 Tarjeta de adquisición NI USB 6009 .....	54
Figura 3. 21 Conexión del amplificador operacional .....	55
Figura 3. 22 Interfaz de presentación .....	55

## Capítulo IV

Figura 4. 1 Escritorio.....	60
Figura 4. 2 Estructura de sujeción de la placa fuente de calor .....	61
Figura 4. 3 Placa fuente de calor.....	62
Figura 4. 4 Aletas de sección circular constante de acero y aluminio .....	63
Figura 4. 5 Aleta triangular de acero .....	64
Figura 4. 6 Montaje de los cartuchos calefactores .....	65
Figura 4. 7 Amplificador de datos.....	65
Figura 4. 8 Circuito amplificador de datos .....	66
Figura 4. 9 Circuito de control de temperatura .....	67
Figura 4. 10 Control de temperatura .....	68
Figura 4. 11 Equipo de superficies extendidas .....	68

## Capítulo V

Figura 5. 1 Regresión lineal de los datos obtenidos .....	70
Figura 5. 2 Variación de la temperatura sin acondicionar .....	72
Figura 5. 3 Variación de temperatura acondicionada .....	73
Figura 5. 4 Curva de distribución, aleta triangular de acero.....	75
Figura 5. 5 Curva de distribución, aleta circular de acero .....	77
Figura 5. 6 Curva de distribución, aleta circular de aluminio.....	79
Figura 5. 7 Curvas experimentales de las aletas .....	80



## MOMENCLATURA

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
$A$	Área de transferencia de calor	$[m^2]$
$A_f$	Área de la superficie de la aleta	$[m^2]$
$A_l$	Área libre, expuesta directamente a la convección	$[m^2]$
$A_s$	Área de transferencia de calor	$[m^2]$
$b$	Señala la posición de la base de la aleta	-----
$c_p$	Calor específico a presión constante	$\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$
$C_1$	Primera constante de la ecuación de transferencia de calor	-----
$C_2$	Segunda constante de la ecuación de transferencia de calor	-----
$dA_s$	Diferencial del área de transferencia de calor	$[m^2]$
$dT$	Diferencial de temperatura	$[^{\circ}C]$
$dt$	Diferencial de tiempo	$[s]$
$dx$	Diferencial de posición	$[m]$
$d\theta$	Diferencial de exceso de temperatura	$[^{\circ}C]$
$\dot{E}_{entra}$	Energía que entra al sistema	$[J]$
$\dot{E}_{sale}$	Energía que sale del sistema	$[J]$
$\dot{E}_{almacenada}$	Energía almacenada	$[J]$
$e$	Exponencial	-----
$f(x)$	Perfil variable de la aleta en función de $x$	-----
$g$	Aceleración Gravitacional	
$\dot{g}$	Energía generada por unidad de volumen	$\left[\frac{W}{m^3}\right]$
$h$	Coefficiente de transferencia de calor por convección	$\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$
$h_c$	Conductancia térmica de contacto	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}\right]$
$h_l$	Convección libre o natural	$\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$
$h_r$	Coefficiente de transferencia de calor por radiación	$\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$
$h_{total}$	Coefficiente global de transferencia de calor	
$I_0$	Constante de primer orden para la ecuación de Bessel	-----
$k$	Conductividad térmica del material	$\left[\frac{W}{mK}\right]$
$k, k_0, k_1$	Constantes tabuladas para la ecuación de Bessel	-----
$L$	Base de la aleta	$[m]$
$L_c$	Longitud característica	$[m]$
$n_f$	Eficiencia de una aleta	-----
$Nu$	Número promedio de Nusselt para un cilindro horizontal	-----

$P$	Perímetro	$[m]$
$P_{elec}$	Potencia eléctrica requerida para los cartuchos	$[w]$
$Pr$	Numero de Prandtl	-----
$q$	Velocidad de conducción de calor	$[w]$
$q_{Aleta}$	Velocidad de conducción de calor de la aleta	$[w]$
$q_{fAlum}$	Velocidad de transferencia de calor para la aleta de aluminio	$[w]$
$q_f$	Transferencia de calor de la aleta	$[w]$
$q_{libre}$	Velocidad de transferencia de calor del área libre	$[w]$
$q_{rad}$	Calor emitido máximo por radiación	$[w]$
$q_{total}$	Velocidad de conducción de calor total	$[w]$
$q_{x+dx}$	Diferencial de la conducción de calor a lo largo del eje x	$[w]$
$q_x$	Velocidad de conducción de calor a lo largo del eje x	-----
$R_A$	Resistencia térmica	$[m^2 K/W]$
$R_{\text{Área libre}}$	Resistencia térmica del aire libre, alrededores	$[m^2 K/W]$
$R_{Aleta}$	Resistencia de la aleta	$[m^2 K/W]$
$R_{aD}$	Numero de Rayleigh	Adimensional
$R_{cart}$	Resistencia medida por cada cartucho	$[\Omega]$
$R_c$	Resistencia térmica por contacto	$[m^2 K/W]$
$R_{E.total}$	Resistencia total de los cartuchos	$[\Omega]$
$R_l$	Resistencia térmica de la sección libre	$\left[\frac{K}{w}\right]$
$T_{alr}$	Temperatura de los alrededores	$[^{\circ}C]$
$T_b$	Temperatura evaluado en b	$[^{\circ}C]$
$T_e$	Temperatura en la superficie trasera de la placa generadora de calor	$[^{\circ}C]$
$T_{prom}$	Temperatura promedio	$[^{\circ}C]$
$T_s$	Temperatura de la superficie	$[^{\circ}C]$
$T_1$	Temperatura de la superficie frontal	$[^{\circ}C]$
$T_2$	Temperatura de la superficie posterior	$[^{\circ}C]$
$T_{\infty}$	Temperatura ambiente, de los alrededores	$[^{\circ}C]$
$V$	Volumen total	$[m^3]$
$\nu$	Viscosidad cinemática	$[m^2/s]$
$x$	Longitud	$[m]$
$x_e$	Distancia a la punta de la aleta	$[m]$
$Y$	Señala la ecuación del perfil de una aleta de sección variable	-----
$\beta$	Coefficiente de expansión volumétrica	$\left[\frac{1}{K}\right]$
$\delta_b$	Indica la altura de la base de una aleta tipo cuña	$[m]$
$\varepsilon$	Emisividad efectiva de la aleta	-----
$\epsilon$	Emisividad	-----
$\theta_b$	Diferencia de temperatura entre la base y el	$[^{\circ}C]$

	fluido,	
$\theta_L$	Diferencia de temperatura entre la posición L y el fluido	[°C]
$\theta_x$	Representa la solución general a la ecuación de transferencia de calor para superficies extendidas	-----
$\rho$	Densidad	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$\sum R_{tér}$	Resistencias térmicas serie-paralelo	-----
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$\left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$
$\Delta T_{interfase}$	Diferencia de temperatura en la brecha	[°C]
$\Delta T_{total}$	Diferencia de temperaturas	[°C]
$\Delta x$	Variación de la posición	[m]
$\infty$	Infinito	-----
$\sum X$	Sumatorio de muestras	-----
T. Rfr	Temperatura de referencia	[°C]
$\bar{X}$	Valor promedio de muestras	[°C]
#Ev	Número de eventos	-----
% Error	Porcentaje de error	-----

## RESUMEN

En el presente proyecto se diseña y construye el equipo para el estudio de la transferencia de calor en superficies extendidas en estado estable, destinado al laboratorio de Transferencia de Calor de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Para alcanzar los objetivos planteados se presenta el desarrollo del proyecto en 6 capítulos que se encuentran estructurados de la siguiente forma:

**CAPÍTULO 1.** Contiene los fundamentos teóricos básicos para el estudio de la transferencia de Calor. Con estos conceptos se parte para el posterior análisis de las ecuaciones de estado unidimensional de transferencia de calor.

**CAPÍTULO 2.** Contiene las consideraciones de estudio para la transferencia de calor en superficies extendidas. Además, se presenta el desarrollo de los modelos matemáticos.

**CAPÍTULO 3.** Se resuelve los modelos matemáticos mediante el uso del programa Wolfram Mathematica. Luego se interpretan los resultados teóricos obtenidos, los cuales permiten hacer el diseño total del equipo de superficies extendidas en estado estable.

**CAPÍTULO 4.** Contiene los pasos necesarios que se deben seguir para la elaboración del equipo. Las operaciones de construcción se realizaron en los distintos laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional.

**CAPÍTULO 5.** Se efectúa un muestreo de datos experimentales de temperatura y se determina el porcentaje de error emitido por el módulo electrónico de adquisición. Posteriormente, se realiza el acondicionamiento de la señal adquirida para luego realizar el análisis de resultados con los datos teóricos y simulados.

**CAPÍTULO 6.** Contiene las conclusiones con respecto a los objetivos del proyecto y los resultados obtenidos. Finalmente se detalla la bibliografía y los anexos respectivos.

## **PRESENTACIÓN**

En varias aplicaciones de la Ingeniería Mecánica se ven involucrados procesos de transferencia de calor. Por este motivo es indispensable que los estudiantes de la materia tengan bases bien definidas al respecto.

Los laboratorios de Ingeniería Mecánica han contribuido al fortalecimiento intelectual de los estudiantes, sin embargo durante el transcurso de los años varios equipos han quedado en desuso.

El presente proyecto ha logrado combinar procesos modernos de adquisición de señales y control de instrumentos los cuales facilita el estudio de la transferencia de calor.

# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

La transferencia de calor es parte de la física teórica, la misma que sirve para describir y relacionar las propiedades físicas de la materia y los intercambios energéticos que en ella ocurren.

La transferencia de calor tiene varias aplicaciones en los diferentes procesos industriales por lo que se hace indispensable para el estudiante conocer los principios físicos involucrados. Con esto en mente se necesita diseñar y construir un equipo enfocado en hacer un estudio más amplio de la transferencia de calor en superficies extendidas, tema que también surgió por la enorme necesidad de implementar nuevos equipos al actual laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela Politécnica Nacional.

### 1.1 DEFINICIONES GENERALES

#### 1.1.1 CALOR

Es la energía en tránsito relacionada con el movimiento aparentemente desordenado de átomos y moléculas de la materia, para comprenderlo mejor el calor siempre fluye desde una región con temperatura más alta hacia otra región con temperatura más baja, figura 1.1.

Por ejemplo, si se aprieta un cubo de hielo con las manos los sentidos detectan frío, dicho de otra manera se sede calor o energía.

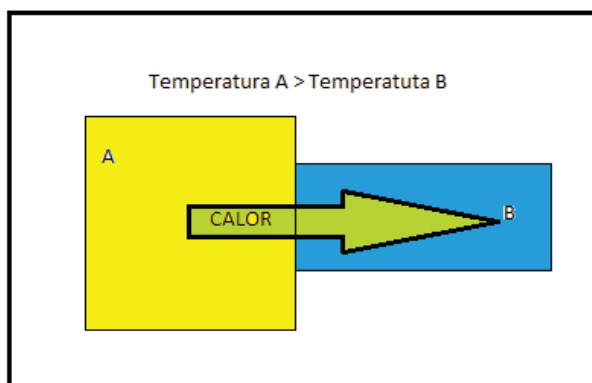


Figura 1.1 Flujo de calor

### 1.1.2 TEMPERATURA

La temperatura es una medida del calor o energía térmica que posee un cuerpo independientemente del estado en que este se encuentre.

### 1.1.3 DIFERENCIA ENTRE TEMPERATURA Y CALOR

El calor y la temperatura están relacionados entre sí, sin embargo son sucesos físicos muy diferentes, el calor es la energía en movimiento mientras que la temperatura es la medida de dicha energía.

El calor depende de:

- La velocidad con que se mueven las partículas
- El tamaño y forma de las partículas

La temperatura no depende de:

- El tamaño de las partículas
- El tipo de partícula

Por ejemplo, figura 1.2, si hace hervir agua en dos recipientes de diferente tamaño, la temperatura alcanzada es la misma para los dos,  $100^{\circ}\text{C}$ , pero el que tiene más agua posee mayor cantidad de calor (Varela, 2010).

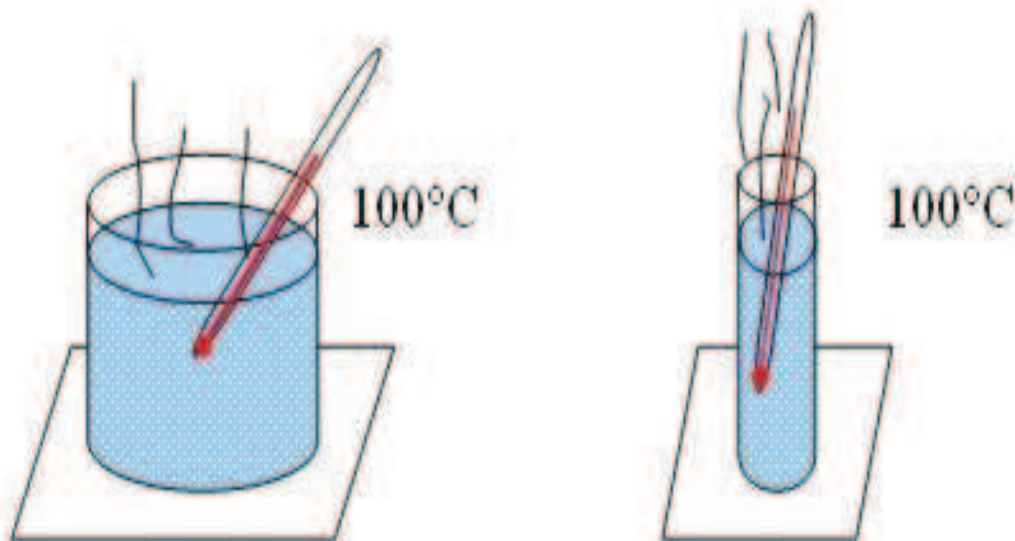


Figura 1.2 Diferencia entre calor y temperatura (Varela, 2010)

### 1.1.4 TRANSFERENCIA DE CALOR

El estudio del calor y otras formas de energía, se lo realiza mediante la ciencia denominada termodinámica. Esta se interesa en la cantidad de calor que se transfiere, a medida que un sistema pasa por un proceso, el cual se manifiesta a

través de estados en equilibrio de la materia. Permitiendo determinar la cantidad de energía que requiere un sistema en forma de calor para que pase de un sistema de equilibrio a otro.

La transferencia de calor es un proceso en desequilibrio termodinámico, para que haya transferencia el requisito es que exista una diferencia de temperatura. El estudio de la misma determina las velocidades de transferencia de calor hacia un sistema.

La velocidad a la que ocurrirá el proceso depende del gradiente de temperatura, el cual establece la diferencia de temperatura por unidad de longitud o la razón de cambio de la temperatura en esa dirección. A una mayor velocidad de transferencia de calor si la diferencia del gradiente de temperatura es grande (Incropera & De Witt, 1999, págs. 2-12).

### **1.1.5 TIPOS O MECANISMOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR**

Se entiende por mecanismo, a los modos físicos de transferencia de calor que permitirán calcular la cantidad de energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura.

El calor es la cantidad de energía que se puede transferir debido a una diferencia de temperatura desde un sistema de temperatura elevada hacia uno de menor temperatura. El proceso se detendrá cuando las dos temperaturas sean las mismas. El calor se transfiere por: conducción, convección y radiación (Kreith & Bohn, 2001, pág. 12).

#### **1.1.5.1 Conducción**

En este mecanismo de transferencia de calor, la transferencia neta de energía sucede debido al movimiento molecular aleatorio, desde las partículas más energéticas a las menos energéticas, debido a la difusión de energía, resultado de una actividad atómica (movimiento transnacional aleatorio) y molecular (movimientos internos de rotación y vibración), figura 1.3.



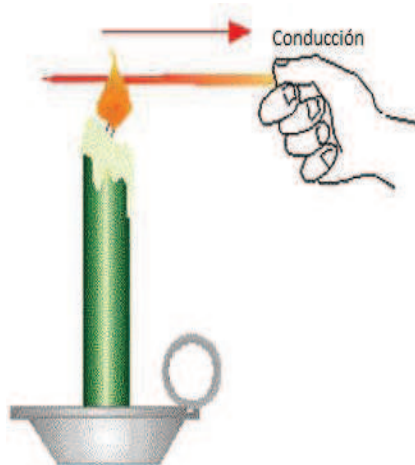


Figura 1.3 Conducción de calor (Coffey, 2010).

La ley de Fourier, establece que la velocidad de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperaturas a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de la capa. Está definida por la siguiente ecuación: (Çengel, 2004, pág. 18).

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec. (1. 1)}$$

Donde:

$\frac{dT}{dx}$  =Es el gradiente de temperatura, razón de cambio de la temperatura respecto a  $x$ .

$k$  = Conductividad térmica del material,  $\left[\frac{w}{mk}\right]$

$A$  =Es el área de transferencia de calor normal o perpendicular a la dirección de esa transferencia,  $[m^2]$

#### 1.1.5.1.1 Conductividad térmica

Se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura.

La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir el calor (Çengel, 2004, pág. 20).

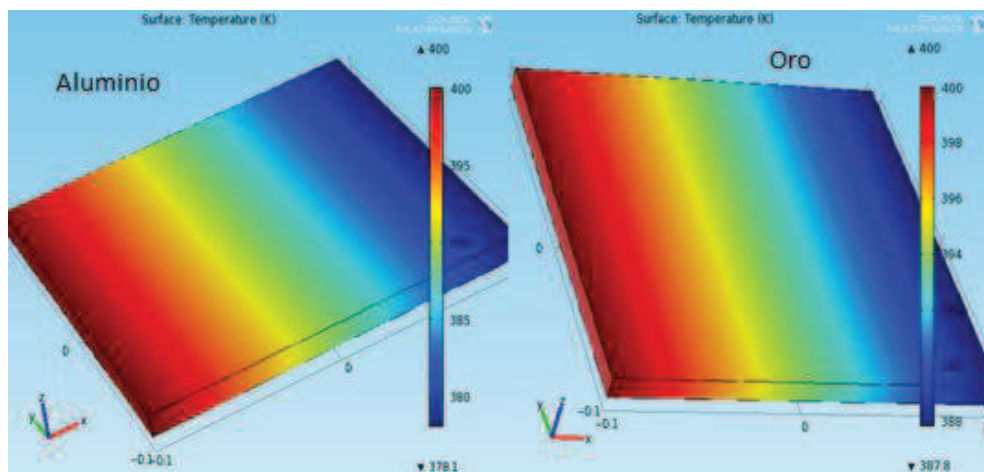


Figura 1.4 Conductividad térmica del aluminio y oro, simulación en COMSOL 4.0

En la figura 1.4 se puede apreciar como la influencia del material es determinante para la conducción del calor. La fuente, puede ser un calentador de resistencia de potencia conocida, el cual suministra una temperatura en el extremo de cada placa de 400 °C, esta temperatura se distribuye a lo largo del eje  $x$ .

A pesar de estar sometidas a una misma temperatura se observa que en el extremo final de cada placa las temperaturas son diferentes. Esto se debe a que los materiales no son iguales así se tiene una conductividad térmica de 237 (W/m\*K) para el caso del aluminio y una conductividad térmica de 317(W/m\*K) para el oro. Esta diferencia en la conductividad térmica permite apreciar la pequeña pero significativa variación de temperatura producida en el extremo de cada placa.

A continuación se presenta en la tabla 1.1 la conductividad térmica de los materiales más comunes.

Tabla 1.1 Conductividad térmica a 273.15 K (Holman, 1999, pág. 24)

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	
	w/m °c	Btu/h.pie.°f
<b>METALES:</b>		
Plata	420	237
Cobre	385	223
Aluminio	202	117
Níquel	93	54
Hierro	73	42
Acero al carbón, 1%C	43	25
Plomo	35	20.3
Acero Cromo-níquel (18%Cr,8%Ni)	16.3	9.4

<b>LÍQUIDOS:</b>	<b>w/m °c</b>	<b>Btu/h.pie.°f</b>
Mercurio	8.21	4.74
Agua	0.556	0.327
Amoníaco	0.540	0.312
Aceite Lubricante, SAE 50	0.147	0.085
Freón 12, CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	0.073	0.042
<b>GASES:</b>	<b>w/m °c</b>	<b>Btu/h.pie.°f</b>
Hidrógeno	0.175	0.101
Helio	0.141	0.081
Aire	0.024	0.0139
Vapor de agua (Saturado)	0.0206	0.0119

### 1.1.5.2 Convección

Es la transferencia de energía entre una superficie y un fluido debido a la diferencia de temperaturas. La convección comprende de dos efectos combinados, primero de la conducción de calor y segundo del movimiento del fluido, si el fluido frente a una placa solida no tiene un movimiento masivo de su masa se denomina convección pura, sin embargo si hay un movimiento masivo del fluido se complica el cálculo de la transferencia de calor por convección.

Considere que un gas o un líquido se calienta, se expande, y se eleva debido a que es menos denso, cuando el gas o el líquido se enfrían, se vuelve más denso y cae, a este movimiento de arriba hacia abajo se denomina corriente de convección, figura 1.5.

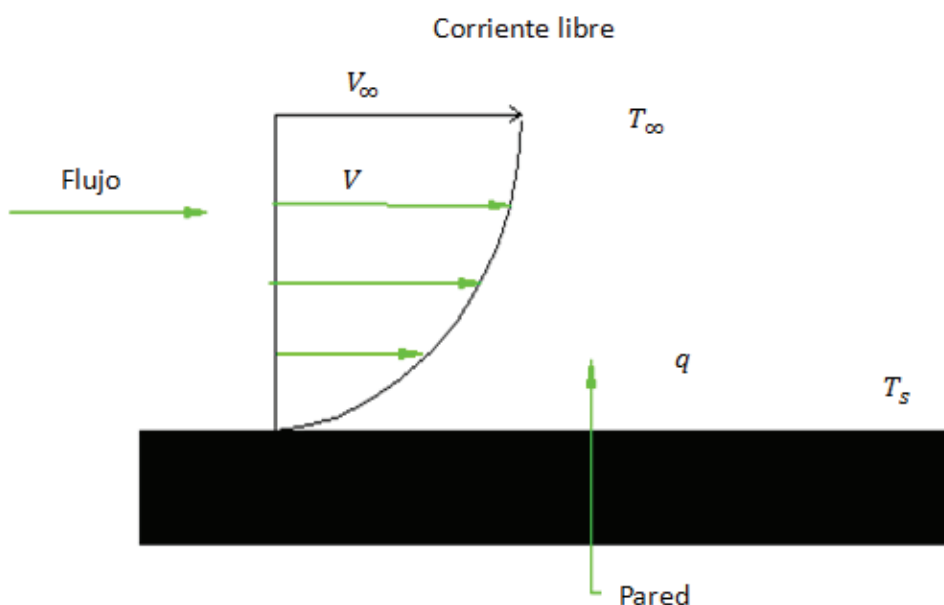


Figura 1.5 Transferencia de calor por convección desde una placa.

La ecuación o modelo que permite calcular la cantidad de energía transferida mediante el mecanismo de convección viene dado por la ley de enfriamiento de Newton (Çengel, 2004, págs. 460-471).

$$q = hA_s(T_s - T_\infty) \quad \text{Ec. (1. 2)}$$

Donde:

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección,  $\left[\frac{w}{m^2k}\right]$

$A_s$  = Área de transferencia de calor,  $[m^2]$

$T_s$  = Temperatura de la superficie,  $[^\circ C]$

$T_\infty$  = Temperatura media del fluido,  $[^\circ C]$

Existen dos tipos de convección, la convección libre y la forzada.

### 1.1.5.3 Convección libre o natural

La convección puede ser natural si el flujo es inducido por fuerzas de empuje producidas por diferencias de densidades originadas por la diferencia de temperatura, las ecuaciones que se necesitan para obtener este tipo de convección considerando una aleta de sección circular constante, ( $L_c = D$ ), se citan a continuación (Çengel, 2004, págs. 460-469).

$$h_l = \frac{Nu * k}{L_c} \quad \text{Ec. (1. 3)}$$

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2, \quad Ra_D \leq 10^{12} \quad \text{Ec. (1. 4)}$$

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad \text{Ec. (1. 5)}$$

Donde:

$Ra_D$  = Numero de Rayleigh

$Nu$  = Número promedio de Nusselt para un cilindro horizontal

$Pr$  = Numero de Prandtl

$L_c$  = Longitud característica para aleta de sección circular constante,  $[m]$

$g$  = Aceleración Gravitacional,  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$\beta$  = Coeficiente de expansión volumétrica,  $\left[\frac{1}{K}\right]$

$\nu$  = Viscosidad cinemática,  $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

#### 1.1.5.4 Convección forzada

La convección también puede ser forzada cuando el flujo es causado por medios externos. La transferencia de calor por convección forzada generalmente hace uso de un ventilador, figura 1.6, el ventilador o la bomba proporciona una alta velocidad al fluido. Como resultado disminuye la resistencia térmica a través la capa límite del fluido a la superficie calentada, esto aumenta la cantidad de calor que es arrastrado por el fluido.

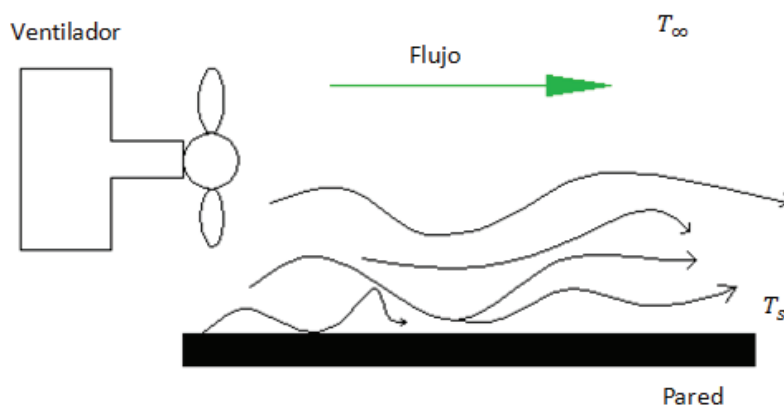


Figura 1.6 Convección forzada

El coeficiente de transferencia de calor " $h$ " determina la capacidad de transferencia de calor de cada fluido se lo obtiene de forma experimental y analítica, cuyo valor dependerá de variables como: configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido. Los valores típicos de este coeficiente de transferencia de calor se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1. 2 Valores del coeficiente de transferencia de calor por convección (Çengel, 2004, pág. 45)

TIPO DE CONVECCIÓN	[h, w/m <sup>2</sup> *°C]
Convección libre de gases	2-25
Convección libre de líquidos	10-1000
Convección forzada de gases	25-250
Convección forzada de líquidos	50-20000
Ebullición y condensación	2500-100000

### 1.1.5.5 Radiación

Este mecanismo de transferencia de calor no requiere de un medio de transmisión como en los dos casos anteriormente mencionados, aquí la transferencia de calor se produce como el resultado de la emisión que la materia puede producir en forma de ondas electromagnéticas (fotones), este modo de transferencia no sufre atenuación en el vacío y es el modo de transferencia más rápido. La radiación es un fenómeno de tipo volumétrico en el cual todos los gases, líquidos, y sólidos la emiten o absorben.

El modelo que permite calcular la transferencia de calor debida a la radiación, se expresa mediante la ley de Stefan-Boltzmann (Incropera & De Witt, 1999, pág. 10).

$$q_{rad} = h_r A_s (T_s - T_{alr}) = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad \text{Ec. (1. 6)}$$

Donde:

$q_{rad}$  = Es el calor emitido máximo por radiación, [w]

$\sigma$  = Es la constante de Stefan-Boltzmann,  $5.67 * 10^{-8} \left[ \frac{w}{m^2 k^4} \right]$

Donde el coeficiente de transferencia de calor por radiación  $h_r$  es:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{alr})(T_s^4 + T_{alr}^4) \quad \text{Ec. (1. 7)}$$

La emisividad ( $\varepsilon$ ) de la superficie esta entre el intervalo de:  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , esta es una medida de cuan próxima esta una superficie de ser un cuerpo negro, siendo la emisividad  $\varepsilon = 1$  para un cuerpo negro, en la tabla 1.3 se presenta la emisividad de algunos materiales.

Tabla 1. 3 Emisividad para distintas superficies (Testo , 2010).

<b>MATERIAL</b>	<b>TEMPERATURA, °C</b>	<b>EMISIVIDAD (<math>\epsilon</math>)</b>
Aluminio, brillante	170	0.05
Asbesto	20	0.96
Hierro, brillante	0	0.97
Hierro, irregular	0	0.99
Hierro, esmerilado	20	0.24
Hierro, grabado	150	0.13
Hierro, oxidado	20	0.61
Cobre, oxidado	130	0.76
Cobre, pulido	20	0.03
Pintura negra	80	0.97
Ladrillo, yeso	20	0.93
Acero	200	0.52
Acero oxidado	200	0.79
Agua	38	0.67
Plásticos(PE; PP; PVC)	20	0.94

### 1.1.6 OTROS FACTORES

#### 1.1.6.1 Característica estructural

Los materiales pueden ser de características semejantes a lo largo de su constitución, es decir uniformes en su estructura, (isotrópicos). O pueden ser de características diferentes en su estructura, tal es el caso de materiales compuestos, en este caso se los menciona como materiales anisótropos.

La estructura del material influye en la transferencia de calor, así un material isotrópico puede conducir el calor de manera uniforme, a lo largo de su estructura. Mientras que un material anisotrópico, si es verdad que conduce el calor, este puede conducir el calor de forma no uniforme, es decir en uno de sus frentes quizás pueda conducir el calor de manera más rápida que en la otra dirección, tal es el caso de la madera.

#### 1.1.6.2 Medio

El medio puede ser determinante, para el tipo de mecanismo de conducción a efectuarse. Se ha mencionado que los mecanismos de conducción o modos de conducción se manifiestan a través de un medio, así: en un fluido, se tiene conducción o convección, un gas no interfiere con la radiación, los gases resultan ser transparentes a la radiación. De manera contraria un líquido actúa como fuente absorbente de la radiación, finalmente en el vacío se tiene solo radiación.

## **CAPÍTULO II.**

### **GENERALIDADES DE LA CONDUCCIÓN DE CALOR UNIDIMENSIONAL EN ESTADO ESTABLE**

En este capítulo se analiza la conducción de calor en estado estable. El término conducción en estado estable, hace mención a que las condiciones de temperatura, densidad y otras propiedades del material son independientes del tiempo en toda la región de la conducción, el hecho de que el flujo sea unidimensional significa que la temperatura es función de una única coordenada espacial.

La conducción unidimensional en estado estable puede darse en varias formas geométricas; en la sección 2.3 nuestra las superficies extendidas las cuales son un claro ejemplo de aplicación; el análisis que se da a las superficies extendidas implica la resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias muy simples para el caso de las aletas de sección transversal constante, no tanto así para las aletas de sección transversal variable donde se trabaja con funciones especiales que exige el conocimiento de las matemáticas avanzadas.

Una amplia gama de problemas reales de transmisión de calor tienen relación directa con la conducción de calor unidimensional estable, en la sección 2.4 se muestran algunos ejemplos.

#### **2.1 CONDUCCIÓN DE CALOR**

La conducción de calor es un mecanismo de transferencia de energía calorífica que se basa en el contacto directo de sus partículas sin flujo neto de materia, debido a un gradiente de temperatura existe transferencia de energía desde la región con más alta temperatura hasta la región con más baja temperatura.

Para describir la conducción de calor se considera una placa de metal que está siendo calentada en un extremo a una temperatura mayor a la que se encuentra el extremo final de la misma, al transcurrir un periodo de tiempo se tiene un



descenso de temperatura desde la base que está expuesta a la fuente de calor hacia el extremo libre, a esto se lo conoce como la distribución de temperatura debido al flujo de calor.

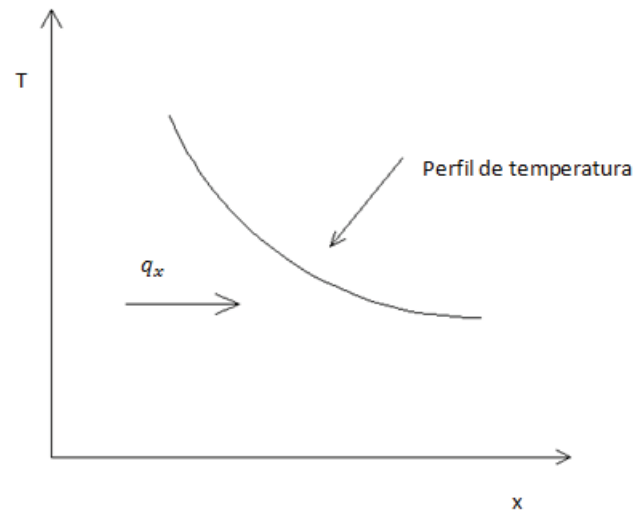


Figura 2. 1 Perfil de temperatura

En la figura 2.1 se observa temperaturas decrecientes, a esto se designa como la ley de Fourier en honor al físico-matemático Joseph Fourier quien hizo grandes contribuciones al análisis analítico de la transferencia de calor. Esta ley establece que la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada, es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección.

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec.(1.1)}$$

## 2.2 CONDUCCIÓN DE CALOR UNIDIMENSIONAL

La conducción de calor unidimensional hace referencia a la variación de temperatura en una sola coordenada.

Este sistema permite explicar varios fenómenos en la naturaleza, tal es el caso de: una plancha metálica, un tubo para vapor de agua, una resistencia eléctrica, un elemento templado por inmersión etc. El caso general que se tiene, es el estudio de la pared plana, figura 2.2, la ecuación 2.1 define de mejor manera este fenómeno (Holman, 1999, pág. 2).

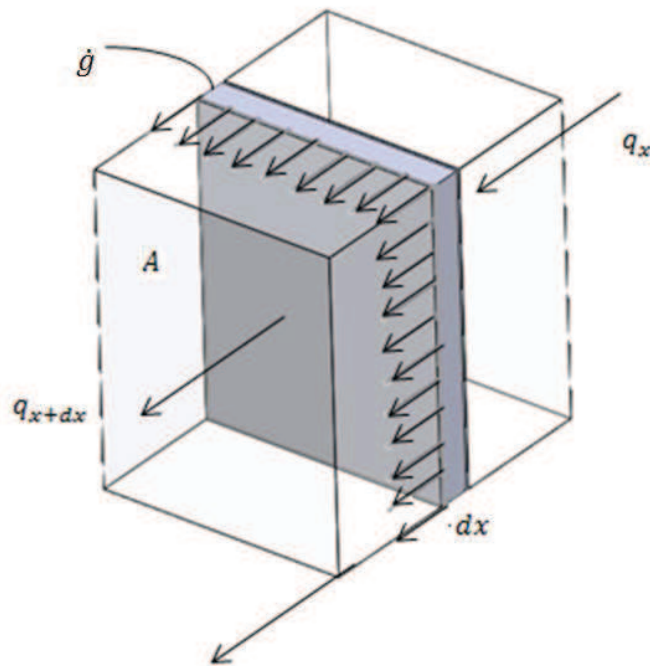


Figura 2. 2 Conducción de calor unidireccional

*Energía que entra + Calor generado*  
 = *Variación de energía interna + Energía que sale*

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{g} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Ec. (2. 1)}$$

Donde:

$\dot{g}$  =Energía generada por unidad de volumen,  $\left[ \frac{W}{m^3} \right]$

$c$  =Calor específico del material,  $\left[ \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right]$

$\rho$  = Densidad,  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

Para el caso en el que la conducción de calor se considera unidimensional estable, se establece que la generación de energía es cero y que no varía con el tiempo, como resultado se tiene la ecuación 2.2 para una pared plana. La figura 2.3 describe la conducción de calor y la ecuación que la gobierna se define con la integración de la ecuación 1.1.

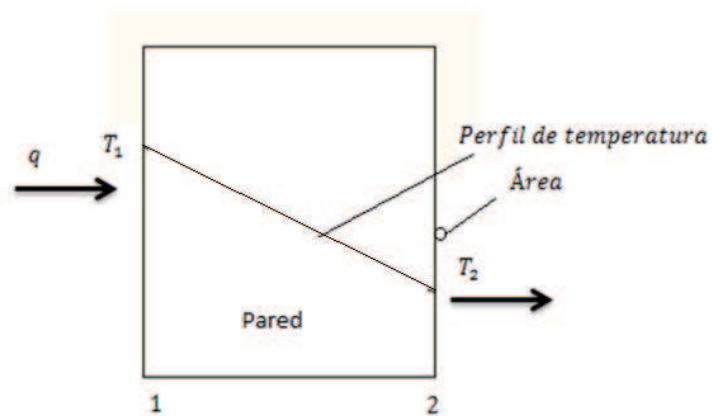


Figura 2. 3 Conducción estacionaria unidimensional

$$q = -\frac{kA}{\Delta x}(T_2 - T_1) \quad \text{Ec. (2. 2)}$$

En aplicaciones prácticas, interactúan varias paredes de diferentes materiales expuestas en sus extremos a un fluido, figura 2.4. En este tipo de arreglos, el flujo de calor unidimensional queda determinado por la ecuación 2.3 (Holman, 1999, pág. 18).

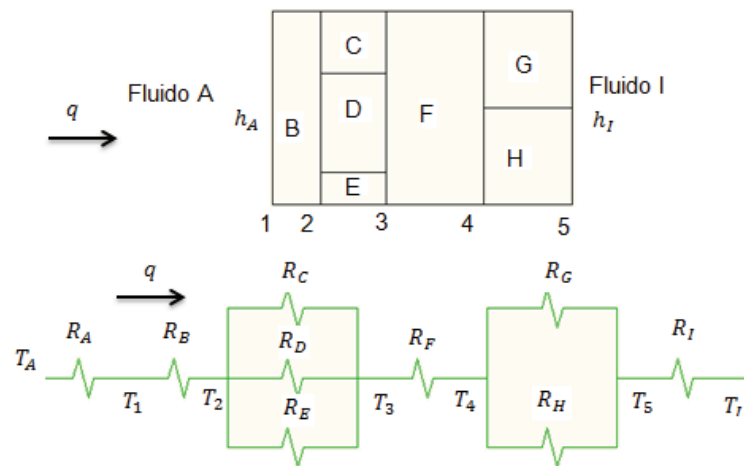


Figura 2. 4 Transferencia de calor unidimensional, serie, paralelo

$$q = \frac{\Delta T_{total}}{\sum R_{tér}} \quad \text{Ec. (2. 3)}$$

Donde:

$\Delta T_{total}$  = Diferencia de temperaturas

$\sum R_{tér}$  = Resistencias térmicas serie-paralelo de diferentes materiales

### 2.2.1 RESISTENCIA TÉRMICA DE CONTACTO

Las superficies no son perfectamente lisas y no producen un contacto perfecto punto a punto, a lo largo de la superficie en contacto, figura 2.5. Lo que genera brechas de aire de dimensiones variables que actúan como un aislante debido a la baja conductividad térmica que presenta el aire, estas brechas de aire generan una caída de temperatura a lo largo de la interfaz, esta variación de temperatura se atribuye a la resistencia térmica de contacto (Incropera & De Witt, 1999, pág. 112).

La resistencia térmica por contacto depende de:

- La aspereza superficial del material.
- Las propiedades de los materiales
- Temperatura y presión en las interfaces.
- Tipo de fluido atrapado: líquido o gas.
- Tipo de flujo atrapado en esta superficie laminar o turbulento.

La transferencia de calor a través de dos barras metálicas de área de sección transversal  $A$ , será igual a la suma de las brechas en las áreas donde no se tiene contacto y se enuncia como: (Çengel, 2004, pág. 138).

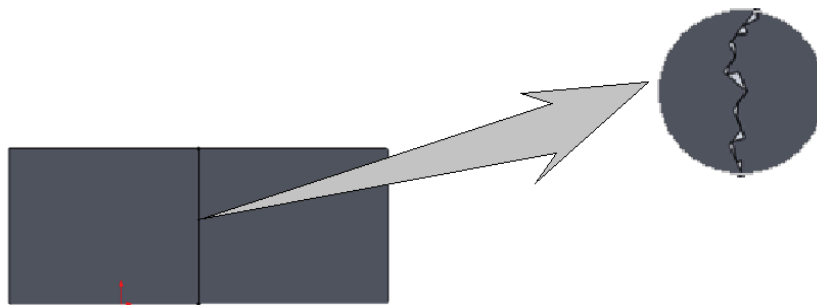


Figura 2. 5 Resistencia de contacto

Aplicando la ley de enfriamiento de newton, ecuación 1.2:

$$q = h_c A \Delta T_{interfase} \quad \text{Ec. (1. 2)}$$

Despejando de la ecuación 1.2  $h_c$  obtenemos la conducción térmica por contacto:

$$h_c = \frac{A}{\Delta T_{interface}} \quad \text{Ec. (2. 4)}$$

Donde:

$\Delta T_{interface}$  = Es la diferencia de temperatura en la brecha,  $[\text{°C}]$

$A$  = Es el área aparente de conducción,  $[m]$

$q$  = Calor transferido,  $[w]$

$h_c$  = Conductancia térmica de contacto,  $\left[\frac{w}{m^2 \cdot \text{°C}}\right]$

La resistencia térmica de contacto es la inversa de la conductancia térmica de contacto:

$$R_c = \frac{1}{h_c} \quad \text{Ec. (2. 5)}$$

### 2.3 SUPERFICIES EXTENDIDAS

Una superficie extendida es aquella que aumenta la transferencia de energía entre una superficie y un fluido adyacente, figura 2.6. Este fenómeno se logra a través del aumento del área superficial que hace contacto con el fluido.

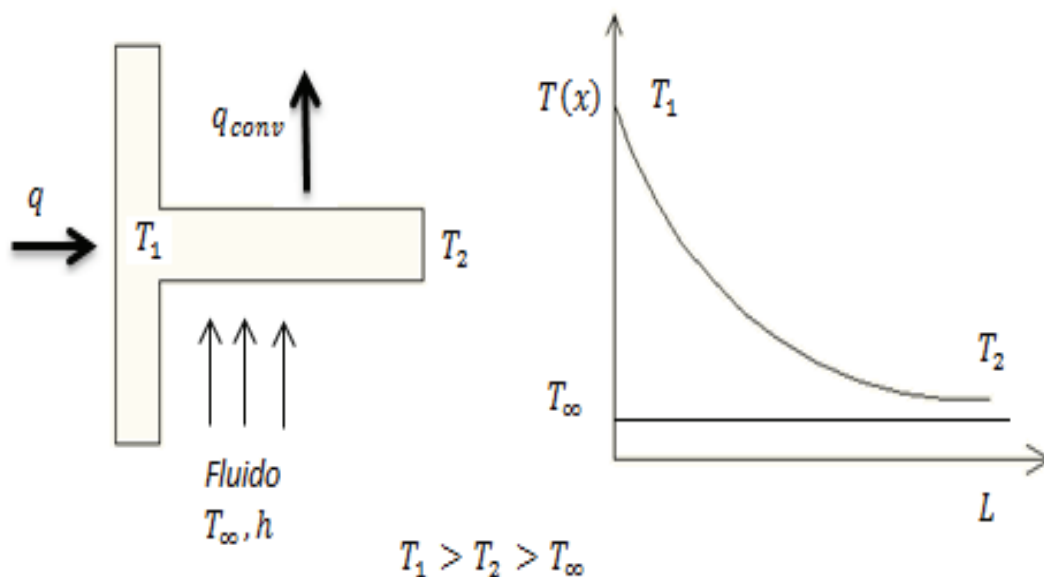


Figura 2. 6 Conducción y convección combinadas en un elemento estructural

Las aletas se agregan para aumentar el producto  $h_{conv}A$  y así disminuir la resistencia térmica por convección  $1/h_{conv}A$ . El objetivo es determinar la variación de la temperatura a lo largo de la aleta y analizar el flujo de calor, a fin de evaluar la eficiencia. Debido a que las aletas son delgadas, se puede suponer que la variación de temperatura es mínima en una de sus direcciones; esta suposición permite tratar la conducción de calor de forma unidimensional, lo que proporciona una buena medida en el análisis (Mills, 1997, pág. 83).

## 2.4 APLICACIONES DE LAS SUPERFICIES EXTENDIDAS

En varias aplicaciones, ver figura 2.7, de la ingeniería se estudia las transiciones de energía que requiere el movimiento rápido de las moléculas que transportan calor, esto produce una creciente demanda de componentes de transferencia de calor de alto rendimiento que incluya en su diseño variables como; peso, volumen y costos cada vez más pequeños.

La transferencia de calor en superficies extendidas hace el estudio de estos componentes de alto rendimiento de acuerdo a una variedad de ambientes donde se desarrollan varios tipos de sistemas térmicos.

Las superficies extendidas tienen aplicaciones tan diversas como:

- Cilindros en motores de motocicletas y podadoras
- En procesos químicos de refrigeración, y criogénicos
- En aparatos eléctricos y electrónicos
- Turbinas de gas
- En disipadores de calor para procesos residuales de calderas
- Intercambiadores de calor
- Módulos de combustible nuclear
- En hornos para tratamientos térmico




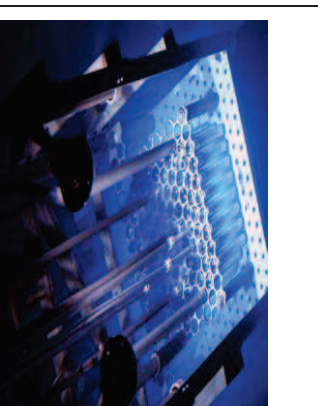

	<p>Cilindros para motores de motocicletas y podadoras (MB Group, 2013).</p>		<p>En procesos químicos de refrigeración, y criogénicos (Melendez, 2010).</p>		<p>Operación en aparatos eléctricos y electrónicos (Gear, 2013).</p>		<p>Turbinas de gas (Sulzer, 2013).</p>
	<p>Operación En disipadores de calor para procesos residuales de calderas (Focus, 2013)</p>		<p>Intercambiadores de calor (Megatech, 2013).</p>		<p>Módulos de combustible nuclear (Dewan &amp; Massie, 2013)</p>		<p>Horno para tratamientos térmicos</p>

Figura 2. 7 Aplicaciones de las superficies extendidas

## 2.5 TIPOS DE SUPERFICIES EXTENDIDAS

Las superficies extendidas varían según su peso, geometría, y ecuaciones resultantes, los arreglos superficiales más comunes son:

- Longitudinales
- Radiales o transversales
- Espinas

### 2.5.1 ALETAS LONGITUDINALES

Se les llama aletas longitudinales a aquellas que tienen tiras anexadas a lo largo de una superficie, estas tiras se sujetan por inserción al tubo o soldadas continuamente por su base, figura 2.8. Este tipo de aletas se usa ampliamente en intercambiadores de doble tubo o en intercambiadores de tubo y coraza sin deflectores cuando el flujo procede a lo largo del eje del tubo, también se los utiliza en problemas que involucran gases y líquidos viscosos que estén en el régimen laminar.

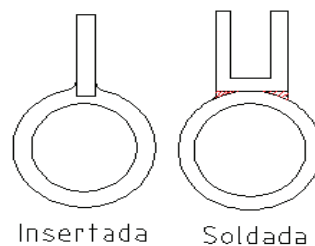


Figura 2. 8 Colocación de aletas

Los perfiles más comunes de las aletas longitudinales son: rectangulares, triangular, parabólico convexa, parabólico cóncava, figura 2.9.

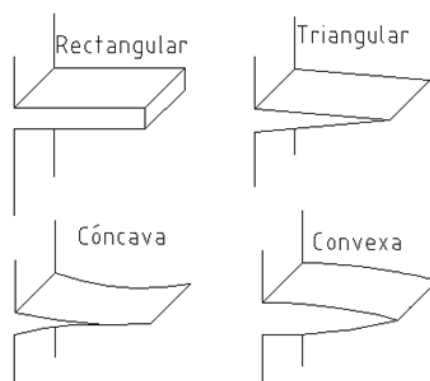


Figura 2. 9 Aletas longitudinales



### 2.5.2 ALETAS RADIALES O TRANSVERSALES

A este tipo de aletas también se les conoce como aletas circulares, el espesor de las aletas puede ser uniforme o variable según su aplicación, está compuesta por discos anulares concéntricos alrededor de un tubo son usadas ampliamente para el calentamiento o enfriamiento de gases en flujo cruzado.

Existen varias maneras de unir la aleta al tubo, en el caso de aletas helicoidales se lo hace insertando la cinta metálica en la parte exterior del tubo el cual tiene unas pequeñas guías por donde pasa la cinta, también se puede soldar la cinta metálica, en el caso de las aletas tipo disco usualmente se suelda el anillo metálico al tubo, otra manera para la obtención de aletas tipo disco es por el método de contracción, el cual consiste en calentar el anillo y enfriar el tubo, con esto se logra que el diámetro del anillo se expanda y el diámetro del tubo se contraiga, una vez unidas las dos piezas se espera a que se estabilicen las temperaturas para tener el ensamblé terminado.

Las formas geométricas de los perfiles de las aletas circulares son: rectangular, triangular e hiperbólica, figura 2.10.

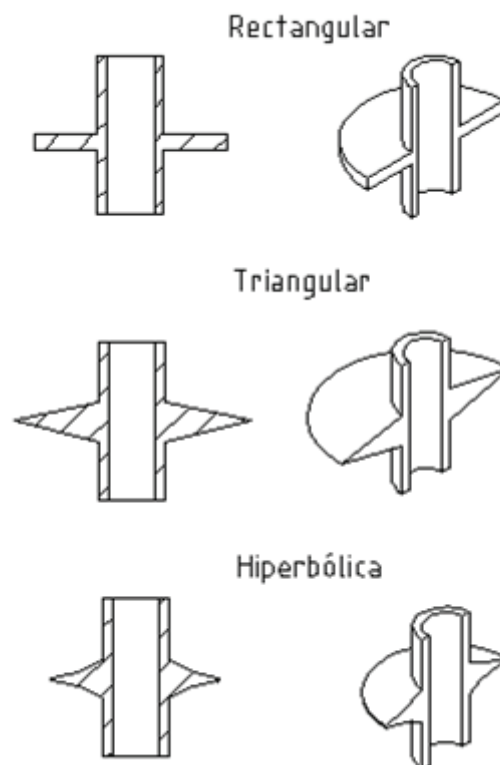


Figura 2. 10 Aletas radiales

### 2.5.3 ESPINAS (Kern, 1999, pág. 593)

Las aletas tipo espina emplean conos, pirámides o cilindros que se extienden desde la superficies del elemento del cual se quiera evacuar el calor, se pueden usar para flujo longitudinal o flujo cruzado. Cada tipo de configuración tiene sus propias características y efectividad, figura 2.11.

Posiblemente el principal uso en el futuro estará localizado en el campo de la energía atómica para la recuperación controlada de calor de fisión, en los intercambiadores para las plantas comerciales de oxígeno, en la propulsión a chorro y en los ciclos de turbinas de gas.

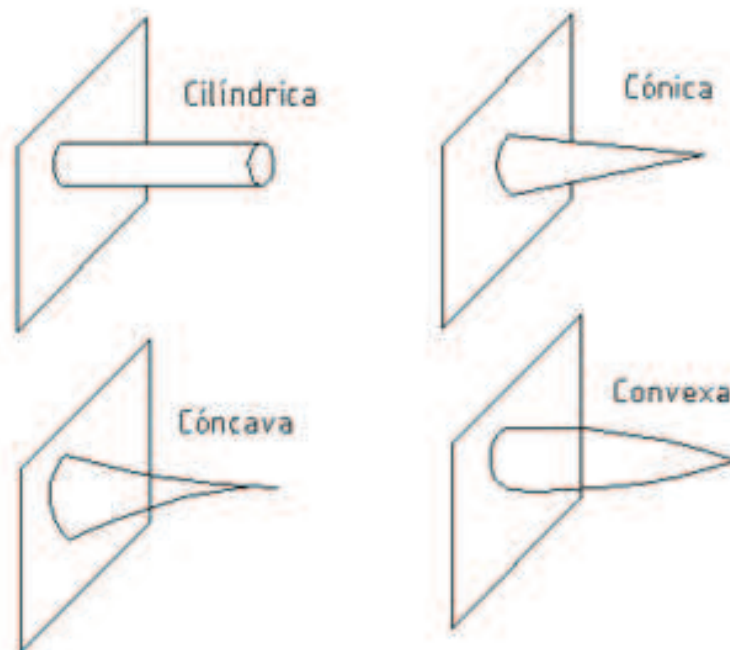


Figura 2. 11 Tipos de espinas

## 2.6 ECUACIÓN GENERAL PARA ALETAS LONGITUDINALES DE SECCIÓN TRASVERSAL CONSTANTE

La expresión matemática que describe a este tipo de aletas se basa en una serie de suposiciones:

1. La conducción de calor es continua y unidireccional.
2. La distribución de temperatura a lo largo de la aleta es independiente del tiempo.

3. La estructura que constituye el material se considera homogénea a lo largo de la aleta.
4. El flujo de calor en la aleta, es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre su base y el extremo de la aleta.
5. Se considera un material isotrópico, por ende su conductividad térmica es constante.
6. El fluido que rodea la aleta, posee la misma temperatura.
7. La convección es constante, en realidad se tiene que: el coeficiente de convección en la base suele ser más bajo que en la punta, esto se debe a que cerca de la base el fluido está rodeado de superficies sólidas, las cuales limitan su movimiento impidiéndole fluir libremente, como en el caso del extremo de la aleta donde no existe ningún tipo de perturbación.
8. La temperatura en la base de la aleta se asume constante
9. Se desprecia los gradientes de temperatura a lo largo de su espesor, esto se puede asumir ya que su espesor es pequeño comparado con el ancho de la aleta.
10. De manera general el análisis, para su operación se considera estacionario sin generación de calor en la aleta.

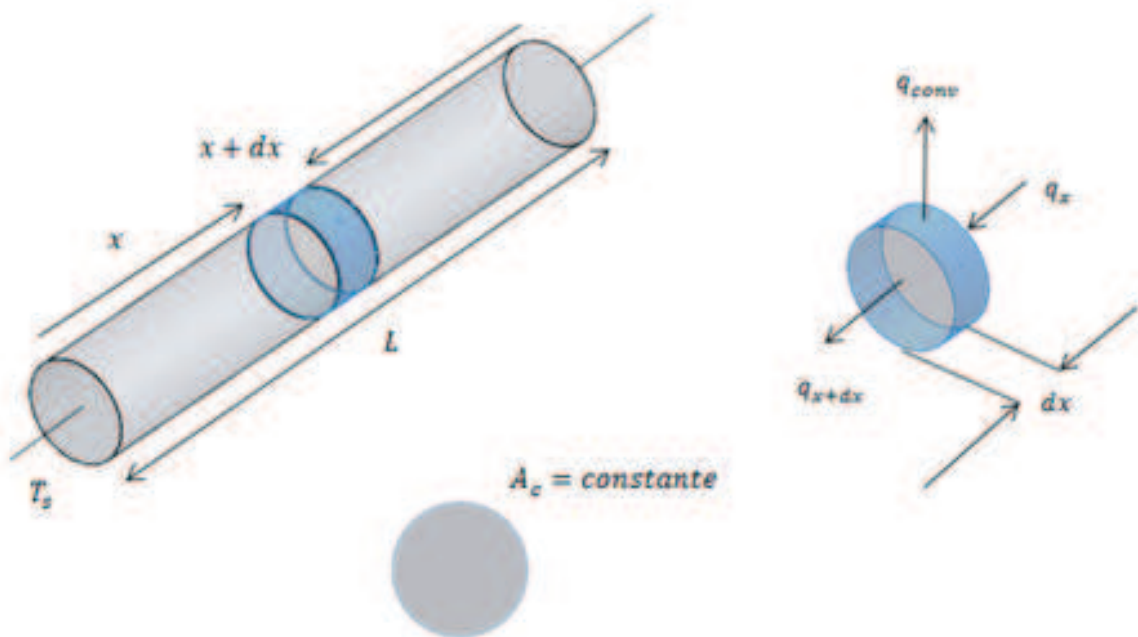


Figura 2. 12 Aletas de sección transversal constante

La figura 2.12 muestra de forma general como son las aletas de sección transversal constante. Efectuando un balance de energía y resolviendo las ecuaciones diferenciales resulta la siguiente ecuación general (Incropera & De Witt, 1999, págs. 113-114).

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \left( \frac{1}{A_c} \frac{dA_c}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left( \frac{1}{A_c} \frac{h}{k} \frac{dA_s}{dx} \right) (T - T_\infty) = 0 \quad \text{Ec. (2. 6)}$$

Se establece que,  $A_c$  es una constante y  $A_s$  es el área de la superficie medida de la base que resulta de multiplicar el perímetro por la variación en  $x$ . En consecuencia se tiene:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hP}{kA_c} (T - T_\infty) = 0 \quad \text{Ec. (2. 7)}$$

Para simplificar la forma de la ecuación 2.7 se utiliza la siguiente expresión  $\theta(x) = T(x) - T_\infty$  y se obtiene una ecuación diferencial lineal de segundo orden homogénea con coeficientes constantes.

$$\theta_x = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad \text{Ec. (2. 8)}$$

Las condiciones de contorno dependen de la situación física en la que se encuentre la aleta, se puede considerar algunos casos: la aleta es muy larga y la temperatura en el extremo es prácticamente la del fluido circundante, la aleta es de longitud finita y pierde calor por convección desde su extremo, el extremo de la aleta está aislado.

En la tabla 2.1 se muestran un resumen de las ecuaciones que resultan de las diferentes condiciones de frontera.

Tabla 2. 1 Ecuaciones diferenciales para diferentes tipos de aletas de sección transversal constante (Incropera & De Witt, 1999, pág. 118).

CASO	CONDICIÓN DE ALETA ( $X=L$ )	DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA $\theta/\theta_b$	TRANSFERENCIA DE CALOR DE LA ALETA $q_f$
1	Aleta infinita ( $L \rightarrow \infty$ ): $\theta(L) = 0$	$e^{-mx}$ <b>Ec. (2. 9)</b>	$M$ <b>Ec. (2. 10)</b>
2	Adiabática: $\left. \frac{d\theta}{dx} \right _{x=L} = 0$	$\frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL}$ <b>Ec. (2. 11)</b>	$M \tanh mL$ <b>Ec. (2. 12)</b>
3	Transferencia de calor por convección: $h\theta(L) = -k \left. \frac{d\theta}{dx} \right _{x=L}$	$\frac{\cosh m(L-x) + (h/mk)\operatorname{senhm}(L-x)}{\cosh mL + \left(\frac{h}{mk}\right)\operatorname{senhm}L}$ <b>Ec. (2. 13)</b>	$M \frac{\operatorname{senhm}L + \left(\frac{h}{mk}\right)\cosh mL}{\cosh mL + \left(\frac{h}{mk}\right)\operatorname{senhm}L}$ <b>Ec. (2. 14)</b>
4	Temperatura establecida: $\theta(L) = \theta_L$	$\frac{\left(\frac{\theta_L}{\theta_b}\right)\operatorname{senhm}(L-x) + \operatorname{senhm}(L-x)}{\operatorname{senhm}L}$ <b>Ec. (2. 15)</b>	$M \frac{(\cosh mL - \theta/\theta_b)}{\operatorname{senhm}L}$ <b>Ec. (2. 16)</b>
$\theta = T - T_\infty; \quad \theta_b = \theta(0) = T_b - T_\infty; \quad m^2 = \frac{hP}{kA_c}; \quad M = \sqrt{hPkA_c}\theta_b$			

## 2.7 ECUACIÓN GENERAL PARA ALETAS LONGITUDINALES DE SECCIÓN TRASVERSAL VARIABLE

En varias aplicaciones prácticas las aletas tienen una sección transversal cuya área  $A_c$  varía entre la base y el extremo. El análisis para este tipo de superficies extendidas se basa en una serie de suposiciones propuestas por Murray en 1938 y Gardner en 1945 estas se exponen a continuación:

1. El flujo de calor en la aleta permanece constante con el tiempo.
2. El material es homogéneo en toda la aleta así también su conductividad térmica es constante.
3. El coeficiente de convección es constante y uniforme en toda la superficie de la aleta.
4. La temperatura del medio circundante en la aleta es constante.
5. Si el espesor de la aleta es pequeño, comparado con la altura y la longitud, se cumple que el gradiente de temperatura a través del espesor de la aleta y la transferencia de calor en los bordes de la aleta pueden ser despreciables.
6. La temperatura en la base de la aleta es uniforme.

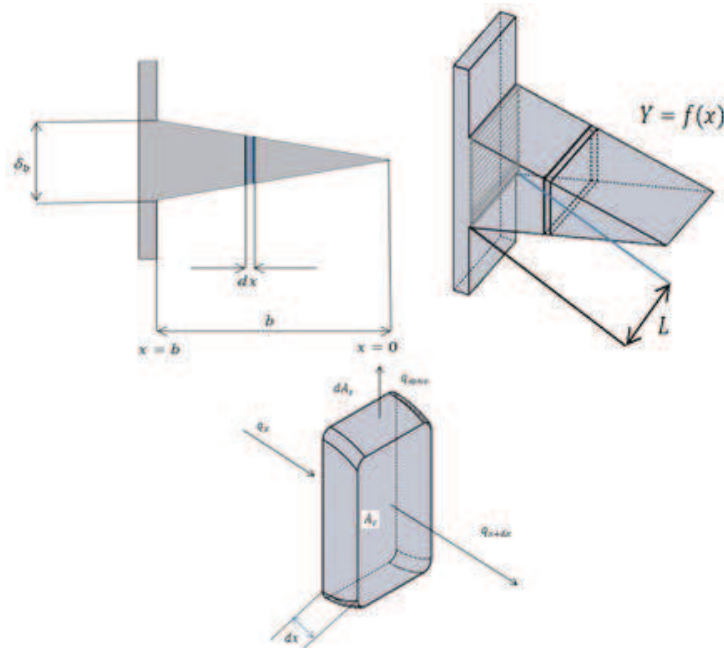


Figura 2. 13 Aletas de sección transversal variable

Basándose en la figura 2.13 se formaliza el análisis matemático, hay que indicar que para obtener las ecuaciones diferenciales para los diferentes arreglos de superficies extendidas de sección variable se debe tener un amplio conocimiento de matemáticas avanzadas ya que el análisis abarca las ecuaciones de Bessel de orden cero, y ecuaciones de Bessel de primer y segunda especie.

Las condiciones de contorno adecuadas se definen con la temperatura conocida en la base y el flujo de calor nulo en el extremo de la aleta, también se debe tener en cuenta la suposición número 5 de Murray y Gardner, con lo sugerido se tiene: (Kraus, Aziz, & Welty, 2001, pág. 12).

$$2L * f(x) \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d(2L * f(x))}{dx} \frac{dT}{dx} - \frac{1}{k} h_{conv} \frac{2Ldx}{dx} (T - T_{\infty}) = 0 \quad \text{Ec. (2. 17)}$$

Al derivar  $\theta = (T - T_{\infty})$  los diferenciales quedan definidos como:  $d\theta = dT$  reemplazando en la ecuación 2.17 se tiene la ecuación general para aletas longitudinales de sección variable.

$$2L * f(x) \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{d(2L * f(x))}{dx} \frac{d\theta}{dx} - \frac{1}{k} 2h_{conv}L\theta = 0 \quad \text{Ec. (2. 18)}$$

Donde:

$h_{conv}$  = Coeficiente de convección de los alrededores

$f(x)$  = Perfil variable de la aleta en función de  $x$

$L$  = Base de la aleta

$k$  = Conductividad térmica del material

Al reemplazar el tipo de perfil deseado en la ecuación 2.18 se puede comparar la ecuación resultante con la ecuación de Bessel generalizada y obtener la distribución de temperaturas enunciadas con las funciones de Bessel. Anexo A.

En la tabla 2.2 se encuentra el resumen de las ecuaciones para este tipo de aletas.

Tabla 2. 2 Resumen de ecuaciones con sección transversal variable (Bejan &amp; Kraus, 201, págs. 205-206).

N°	TIPO DE ALETA	DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA $\theta/\theta_b$	TRANSFERENCIA DE CALOR DE LA ALETA $q_f$
1	TRAPEZOIDAL	$\frac{I_0(2m\sqrt{bx})k_1(2m\sqrt{bx_e}) + k_0(2m\sqrt{bx})I_1(2m\sqrt{bx_e})}{I_0(2mb)k_1(2m\sqrt{bx_e}) + k_0(2mb)I_1(2m\sqrt{bx_e})}$ <b>Ec. (2. 19)</b>	$km\delta_b L\theta_b \frac{I_1(2mb)k_1(2m\sqrt{bx_e}) - k_1(2mb)I_1(2m\sqrt{bx_e})}{I_0(2mb)k_1(2m\sqrt{bx_e}) + k_0(2mb)I_1(2m\sqrt{bx_e})}$ <b>Ec. (2. 20)</b>
2	TRIANGULAR	$\frac{I_0(2m\sqrt{bx})}{I_0(2mb)}$ <b>Ec. (2. 21)</b>	$km\delta_b L\theta_b \frac{I_1(2mb)}{I_0(2mb)}$ <b>Ec. (2. 22)</b>
3	CONVEXA PARABÓLICA	$\left(\frac{x}{b}\right)^{1/4} \left[ \frac{I_{-1/3}\left(\frac{4}{3}mb^{1/4}x^{3/4}\right)}{I_{-1/3}\left(\frac{4}{3}mb\right)} \right]$ <b>Ec. (2. 23)</b>	$m\delta_b L\theta_b \frac{I_{2/3}\left(\frac{4}{3}mb\right)}{I_{-1/3}\left(\frac{4}{3}mb\right)}$ <b>Ec. (2. 24)</b>
		$m = \sqrt{\frac{2h}{k\delta_b}}$	$x_e = \text{Es la distancia a la punta de la aleta}$



## 2.8 EFICIENCIA DE LAS ALETAS

Es la medida del desempeño de una aleta, esta expresión relaciona la velocidad real de transferencia de calor con la velocidad máxima a la que una aleta puede disipar energía, que es la rapidez que existiría si toda la superficie de la aleta estuviera a la temperatura de la base, de esta forma la ecuación para la eficiencia de la aleta queda definida de la siguiente manera: (Incropera & De Witt, 1999, pág. 122).

$$n_f = \frac{q_f}{q_{M\acute{a}x}} = \frac{q_f}{h A_f \theta_b} \quad \text{Ec. (2. 25)}$$

Donde:

$q_f$  = Transferencia de calor de la aleta, [w]

$A_f$  = Area de la superficie de la aleta, [ $m^2$ ]

$\theta_b$  = Diferencia de temperatura entre la base y el fluido, [ $^{\circ}C$ ]

### 2.8.1 RESISTENCIA TÉRMICA DE LAS ALETAS

La resistencia térmica de una aleta hace mención a la capacidad que tiene la misma para oponerse al flujo de calor, la resistencia térmica dependerá del tipo de material siendo estos en su mayoría materiales homogéneos.

Resulta muy útil tener una expresión para la resistencia térmica de una aleta para utilizarse en los circuitos térmicos. Así la resistencia térmica queda identificada con la ecuación 2.24 (Mills, 1997, pág. 92).

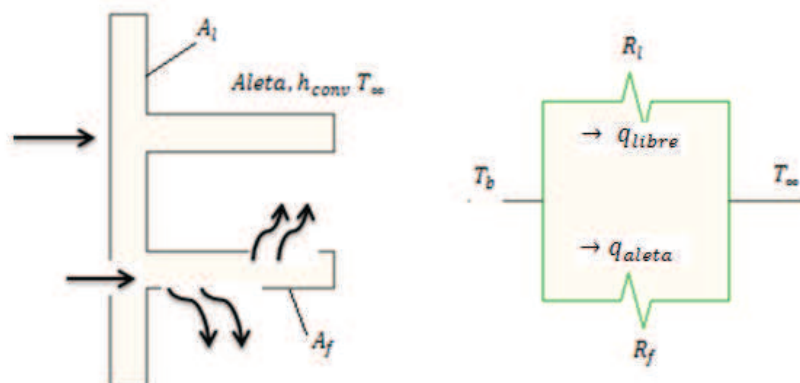


Figura 2. 14 Resistencia de una aleta

$$R_a = \frac{\theta_b}{q_f} \quad \text{Ec. (2. 26)}$$

Dónde:

$\theta_b$  = Diferencia de Temperaturas en la base, [ $^{\circ}C$ ]

$q_f$  = Flujo de calor de la aleta, [ $w$ ]

Al observar la figura 2.14 se aprecia que la resistencia total comprende tanto de la conducción a lo largo de la aleta como la convección hacia el fluido desde la superficie libre. En el arreglo se observa dos vías paralelas para la pérdida de calor: una a través de la aleta y otra a través de la superficie libre, La resistencia térmica para la sección libre se determina con la siguiente ecuación: (Holman, 1999, pág. 33).

$$R_l = \frac{1}{h_{conv}A_l} \quad \text{Ec. (2. 27)}$$

Donde:

$R_l$  = Resistencia térmica de la sección libre, [ $\frac{k}{w}$ ]

$A_l$  = Área libre, expuesta directamente a la convección, [ $m^2$ ]

Sumando la transferencia de calor en la sección libre con la transferencia de calor de la aleta, se adquiere la transferencia de calor total que se expresa en función de las resistencias térmicas en [ $w$ ].

$$q = q_{Aleta} + q_{libre} \quad \text{Ec. (2. 28)}$$

## **CAPÍTULO III.**

### **DISEÑO DEL EQUIPO Y SIMULACIÓN DE LAS ALETAS**

En el presente capítulo se calculará la potencia necesaria para que las superficies extendidas lleguen a su estado estable, también se realizará el diseño de la placa fuente calefactora con elementos disponibles en el mercado, para el uso e instalación de algunos instrumentos se seguirá los pasos recomendado por el fabricante.

La simulación por elementos finitos en COMSOL 4.0 será la que permitirá observar cómo se van a comportar las aletas, lo que permite optimizar el diseño de las aletas.

El programa de LabView permitirá obtener datos físicos proporcionados por las termocuplas, estos serán procesados y llevados a un ordenador para visualizar el proceso de transferencia de calor en las diferentes superficies extendidas.

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO**

El equipo, figuras 3.1 y 3.2, consiste de una fuente de energía calorífica que es calentada con una resistencia eléctrica. La fuente de calor estará controlada por una DAQ (adquisidor de datos) esta se encargará de que la temperatura de la fuente sea constante; el montaje del mismo se lo realiza colocándolo en una estructura metálica la cual estará previamente aislada para evitar las pérdidas de calor a su alrededor.

Las aletas que son instaladas en la base de la fuente de calor alcanzarán su temperatura de operación y en ese momento se registran los datos de temperatura a un ordenador, o también llamado HMI (Interfaz hombre Máquina). Para obtener la temperatura se instalará termocuplas, la señal eléctrica que proporcione la termocupla primero será amplificada y luego llevada al DAQ.



Figura 3. 1 Equipo para el laboratorio de transferencia de calor

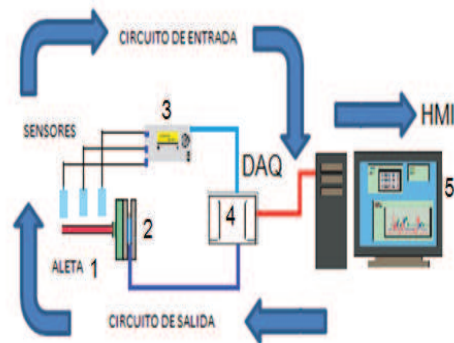


Figura 3. 2 Secuencia de funcionamiento del equipo

1. Superficie extendida
2. Generador de Calor
3. Circuito de acoplamiento de la señal
4. DAQ tarjeta de adquisición de datos
5. Programa en LabView (HMI)

### 3.2 POTENCIA REQUERIDA

Para alcanzar el objetivo propuesto se debe calcular la potencia eléctrica que necesitan las resistencias calefactoras para poder generar el calor suficiente para que las aletas lleguen a su temperatura de operación.

#### 3.2.1 CONSIDERACIONES QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA

Para el cálculo de la potencia requerida, se considera lo siguiente:

- Dimensiones de la fuente de calor.
- Dimensiones y material de las aletas.

- Temperatura máxima superficial.
- Recubrimientos de la fuente de calor.
- Temperatura de los alrededores.
- Coeficiente de convección.

### 3.2.1.1 Dimensiones de la fuente de calor

Se establece que la fuente de calor está compuesta de una placa cuadrada de aluminio de 1200mm con un pesor de 20mm, en medio de la placa habrá un vaciado el cual será de las dimensiones de las resistencias calefactoras.

### 3.2.1.2 Dimensiones de las aletas

Las aletas que se va a construir son:

- Aleta de sección circular constante de aluminio
- Aleta de sección circular constante de acero
- Aleta triangular de acero

Las dimensiones se muestran en la figura 3.3.

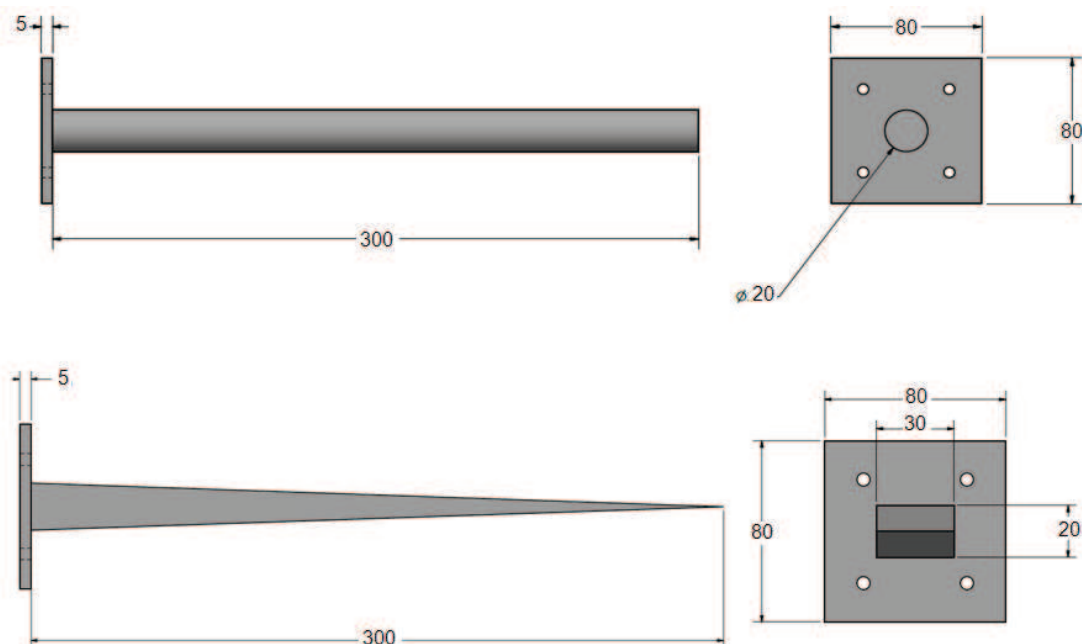


Figura 3. 3 Dimensiones de las aletas

### 3.2.1.3 Temperatura máxima superficial

Considerando que la fuente de calor va a ser acoplada a diferentes aletas. Se establece que la temperatura en la base de la aleta es de 100°C.

### 3.2.1.4 Recubrimientos de la fuente de calor

Se utilizará Nutec Fibratec tipo placa, este material tiene excelentes propiedades aislantes. Es ideal para resistir altas temperaturas y tiene una baja conductividad térmica, estas propiedades permitirá que las resistencias calefactoras no sufran sobreesfuerzo térmico y puedan trabajar con normalidad durante varias horas.

Las características y especificaciones técnicas se muestran en el anexo B.

### 3.2.1.5 Temperatura de los alrededores

Según la unión internacional de química pura y aplicada (IUPAC, siglas en inglés) recomienda que las temperaturas estándares para los laboratorios sean alrededor de 20°C, se toma este valor como parámetro de diseño.

### 3.2.1.6 Coeficiente de convección

Para tener un coeficiente de convección más cercano a la realidad se debe tomar el coeficiente de convección total, teniendo en cuenta esto se establece la ecuación 3.1.

$$h_{total} = h_r + h_l \quad \text{Ec. (3. 1)}$$

#### 3.2.1.6.1 Consideraciones para el cálculo del coeficiente de convección

Para el cálculo del coeficiente de convección total se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Toda la superficie de la aleta se encuentra a la temperatura de la base debido a que es allí donde se obtiene la mayor pérdida de calor.
- Las propiedades del aire se las tomará a una temperatura promedio.
- El coeficiente de convección para la aleta de sección circular de aluminio es constante e igual para todas las aletas, debido a que esta es la que presenta la mayor transferencia de calor.

#### 3.2.1.6.2 Cálculo del coeficiente de convección

Las propiedades del aire se toman a una temperatura promedio. Propiedades anexo C.

$$T_{prom} = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{373 + 293}{2} = 333[K]$$

De las ecuaciones 1.7, 1.5, 1.4, 1.3 y con una emisividad para el aluminio de 0.05 se calcula:

$$h_r = 0.05 * 5.67 * 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right] (373 + 293)[^{\circ}k] (373^2 + 293^2)[K^2]$$

$$h_r = 0.424 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$R_{ad} = \frac{9.8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] * \frac{1}{343} \left[ \frac{1}{K} \right] * (373 - 293)[K] * 0.02^3 [m^3]}{(19.209 * 10^{-6})^2 \left[ \frac{m^2}{s} \right]^2} * 0.7023$$

$$R_{ad} = 34803.6734$$

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 * 34803.6734^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.559}{0.7023} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$$

$$Nu = 5.925$$

$$h_l = \frac{5.925 * 28.742 * 10^{-3} \left[ \frac{W}{m * K} \right]}{0.02[m]}$$

$$h_l = 8.514 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

Remplazando los valores en la ecuación 3.1 se obtiene:

$$h_{total} = 0.424 + 8.514 = 8.938 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

### 3.2.2 Cálculo de la potencia requerida en las aletas

Se necesita saber cuál de las tres aletas requiere más energía, solo así se podrá saber el valor máximo de potencia parámetro fundamental para la construcción del equipo.

#### 3.2.2.1 Aleta de aluminio de sección circular constante

En la figura 3.3 se muestran las dimensiones, asimismo se toma en cuenta las siguientes consideraciones para el cálculo de la potencia:

- Condiciones de estado estable
- Conducción unidimensional a lo largo de la aleta
- Propiedades constantes
- Coeficiente de convección uniforme sobre la superficie externa (con o sin aleta)

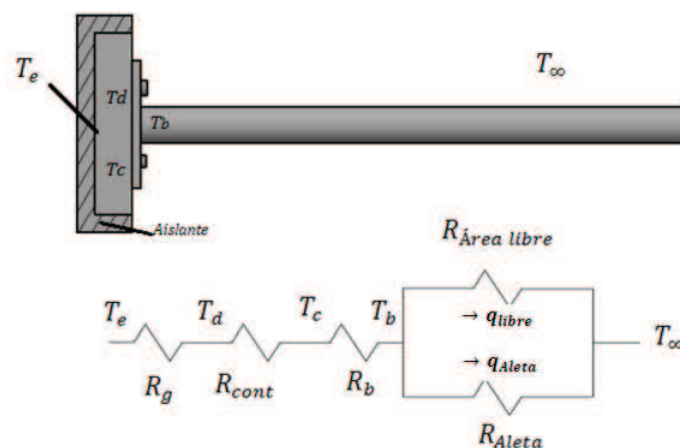


Figura 3. 4 Diagrama de resistencias térmicas

La potencia total debe ser igual a la potencia requerida más un factor de seguridad del 20% (Maxiwatt, 2010).

De la figura 3.4 se deduce la ecuación para el flujo total de calor como:

$$q_{total} = 1.2\% * (q_{Aleta} + q_{libre}) [w]$$

Utilizando las ecuaciones 2.12; 2.26; 2.27 se obtiene:



$$M = \sqrt{8.938 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right] * \pi * 0.02[m] * 237.99 \left[ \frac{W}{m * K} \right] * \pi * \left( \frac{0.02}{2} \right)^2 [m^2] * 80[K]}$$

$$M = 16.389[w]$$

$$m = \sqrt{\frac{8.938 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right] * \pi * 0.02[m]}{237.99 \left[ \frac{W}{m * K} \right] * \pi * \left( \frac{0.02}{2} \right)^2 [m^2]}}$$

$$m = 2.74 \left[ \frac{1}{m} \right]$$

Transferencia de calor de la aleta, es:

$$q_{fAlum} = 16.389[w] \tanh\left\{ 2.74 \left[ \frac{1}{m} \right] * 0.3[m] \right\} = 11.085 [w]$$

Transferencia de calor del área libre

$$q_{libre} = (0.07^2 - \pi * 0.01^2)[m^2] * 8.938 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right] * (100 - 20)[K] = 3.27[w]$$

Potencia.

$$q = 11.085 + 3.27 = 14.36[w]$$

$$q_{Total} = 14.73 * 1.2\% = 17.22[w]$$

### 3.2.2.2 Aleta de acero de sección circular constante

El procedimiento de cálculo es el mismo que se ha efectuado para la aleta de sección circular constante de aluminio.

$$q_{Total} = 1.2\% * (6.917 + 3.27) = 12.22[w]$$

### 3.2.2.3 Aleta triangular de acero

En este tipo de aleta se utiliza las ecuaciones 2.22; 2.26; 2.27.

$$m = \sqrt{\frac{2 * 8.938 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]}{46.737 \left[ \frac{W}{m * K} \right] * 0.02[m]}}$$

$$m = 4.37 \left[ \frac{1}{m} \right]$$

$$q_f = 9.80[w] * \frac{I_1(2 * 4.37 \left[ \frac{1}{m} \right] * 0.3[m])}{I_0(2 * 4.37 \left[ \frac{1}{m} \right] * 0.3[m])}$$

$$q_f = 7.63[w]$$

Transferencia de calor del área libre

$$q_{libre} = (0.07^2 - 0.03 * 0.02)[m^2] * 8.938 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right] * (100 - 20)[K] = 3.07[w]$$

Potencia.

$$q = 7.63 + 3.07 = 10.70[w]$$

$$q_{Total} = 1.2\% * 10.70 = 12.84[w]$$

De los resultados anteriores se concluye que la aleta que tiene la transferencia de calor más alta es la aleta de sección circular constante de aluminio

$$Potencia\ total\ requerida = 17.22[w]$$

### 3.3 TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN DE LAS ALETAS

Es importante estimar el tiempo en que el equipo llega a estabilizarse, para lograr este objetivo se toma en cuenta ciertos parámetros que intervienen en el estado transitorio.

- Temperatura de los alrededores
- Temperatura inicial de las superficies

- Materiales que van a almacenar la energía
- Balance energético en estado transitorio

### 3.3.1 TEMPERATURA DE LOS ALREDEDORES

La temperatura de los alrededores será igual en todo el proceso y será igual a 20°C

### 3.3.2 TEMPERATURA INICIAL DE LAS SUPERFICIES

La temperatura de las superficies en el momento en que comienza el proceso de calentamiento será igual a 20°C esta ira incrementando hasta llegar a estabilizarse.

### 3.3.3 MATERIALES QUE ALMACENAN ENERGÍA

Los materiales que van a almacenar la energía calorífica será la fuente calefactora de aluminio, las aletas de sección circular de aluminio y acero y la aleta triangular de acero. Anexo D.

### 3.3.4 BALANCE ENERGÉTICO EN ESTADO TRANSITORIO DE LOS DIFERENTES TIPO DE ALETAS

Se establece la ecuación 3.2 donde la energía que ingresa es igual a la potencia total suministrada, y la energía que sale está dada por las pérdidas que se producen por convección y radiación; la energía almacenada se la conoce como capacitancia térmica y está definida con la ecuación 3.3.

$$\dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{almacenada} \quad \text{Ec. (3. 2)}$$

$$\dot{E}_{almacenada} = (\rho * V * c_p) * \frac{dT_s}{dt} \quad \text{Ec. (3. 3)}$$

#### 3.3.4.1 Balance energético, aleta de aluminio de sección circular constante

La energía almacenada se calcula con la ecuación 3.3. Esto da como resultado:

$$V = (0.08^2 * 0.005) + (\pi * 0.01^2 * 0.3) = 1.26 * 10^{-4} [m^3]$$

$$\dot{E}_{almacenada} = \left( 2702 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * 1.26 * 10^{-4} [m^3] * 936.58 \left[ \frac{J}{kg * K} \right] \right) * \frac{dT_s}{dt}$$

$$\dot{E}_{almacenada} = 319.48 \left[ \frac{J}{K} \right] * \frac{dT_s}{dt}$$

Utilizando las ecuaciones 1.2; 1.6 y reemplazando en la ecuación 3.2 se tiene:

$$7.22[w] - hA_s(T_s - T_{alr}) - \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4) = 319.48 \left[ \frac{J}{K} \right] \frac{dT_s}{dt} \quad \text{Ec. (3. 4)}$$

La temperatura  $T_s$  será la que queda como incógnita en la ecuación diferencial; reemplazando los valores en la ecuación 3.4 se tiene la ecuación diferencial de cuarto grado, la misma que será resuelta con la ayuda del programa Wolfram Mathematica.

La ecuación en estado transitorio queda definida como:

$$17.22[w] - 0.2941(T_s - 293) - 9.33 * 10^{-11}(T_s^4 - 293^4) = 319.48 \left[ \frac{J}{K} \right] * \frac{dT_s}{dt}$$

### 3.3.4.2 Balance energético, aleta de acero de sección circular constante

$$17.22[w] - 0.2941(T_s - 293) - 1.86 * 10^{-10}(T_s^4 - 293^4) = 454.24 \left[ \frac{J}{K} \right] * \frac{dT_s}{dt}$$

### 3.3.4.3 Balance energético, aleta triangular de acero

$$V = (0.08^2 * 0.005) + (0.02 * 0.3 * 0.03) = 2.12 * 10^{-4} [m^3]$$

$$\dot{E}_{almacenada} = \left( 7836 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * 2.12 * 10^{-4} [m^3] * 459.17 \left[ \frac{J}{kg * K} \right] \right) * \frac{dT_s}{dt}$$

$$\dot{E}_{almacenada} = 762.78 \left[ \frac{J}{K} \right] * \frac{dT_s}{dt}$$

$$17.22[w] - 0.3911(T_s - 293) - 2.48 * 10^{-10}(T_s^4 - 293^4) = 762.78 \left[ \frac{J}{K} \right] * \frac{dT_s}{dt}$$

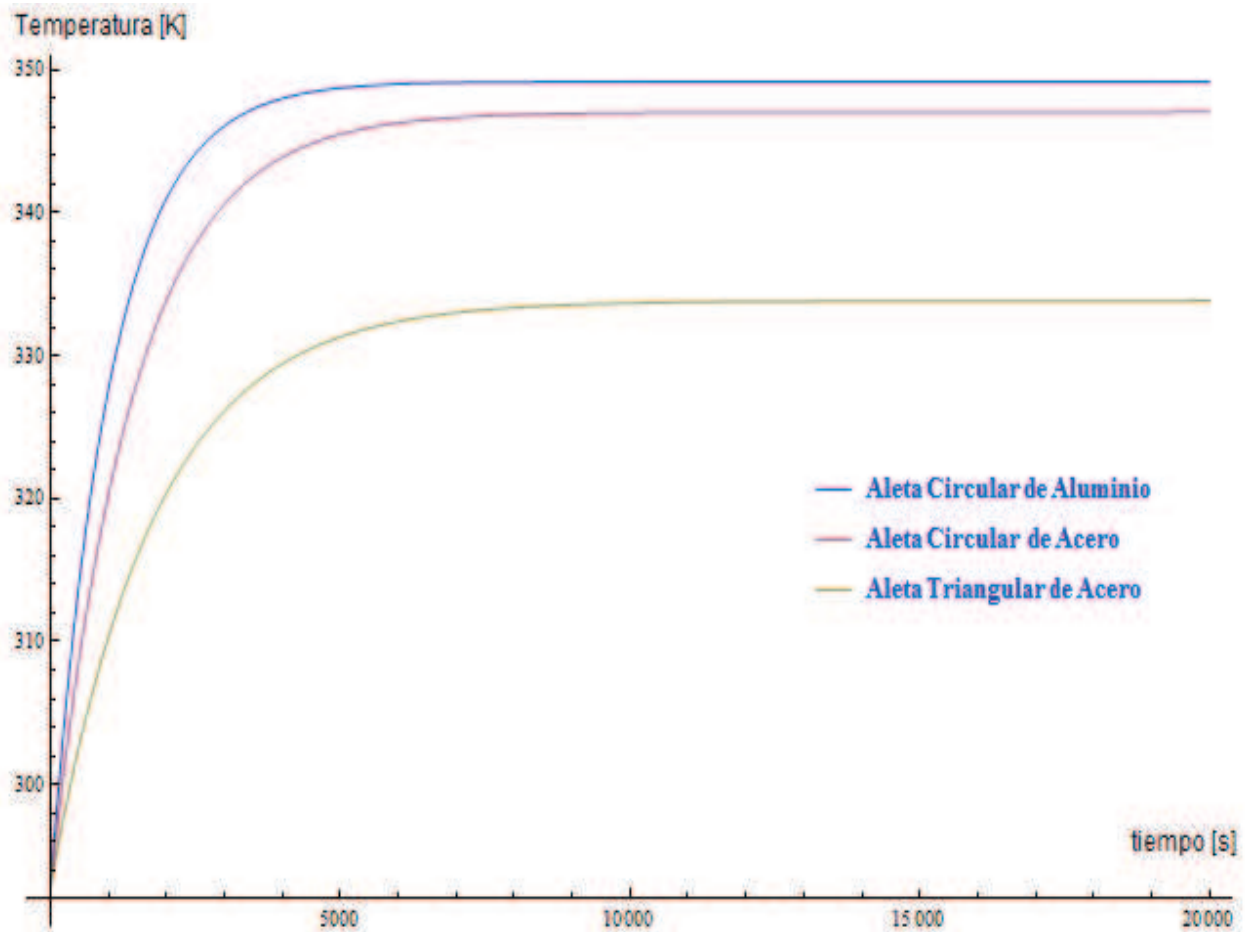


Figura 3. 5 Tiempo de estabilización de las aletas

En la figura 3.5 se observa que con una potencia de 17.22 [w] el tiempo que tardan las aletas en obtener la temperatura estable está alrededor de 5000 segundos, tiempo que no puede ser debido a que la práctica se demora alrededor de un 90 minutos, para solucionar este inconveniente se debe variar la potencia suministrada y se escogerá aquella que sea fácil de encontrar en el mercado y que tenga un tiempo razonable para efectuar la práctica. En la figura 3.6 se obtienen las siguientes curvas simuladas para diferentes valores de potencia.

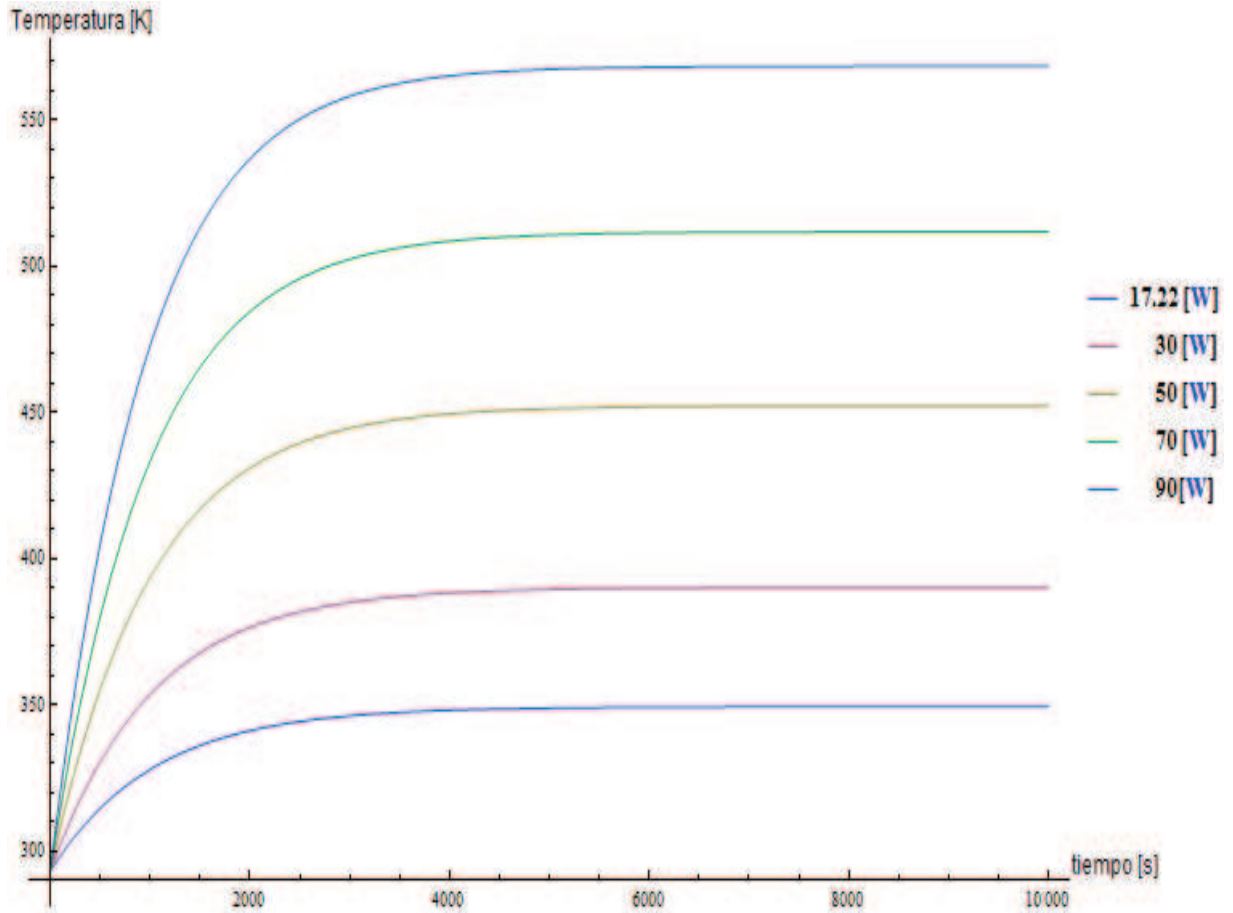


Figura 3. 6 Tiempo de estabilización para diferentes potencias

Analizando las curvas obtenidas para diferentes potencias en la aleta de sección circular constante de aluminio se ve claramente que mientras más potencia se hace incidir en la aleta el tiempo de estabilización disminuye. Una potencia razonable es de 50[w], el tiempo que demora para obtener una temperatura de 373K y estabilizarse es de 700 segundos que es alrededor de 12 minutos, tiempo que es conveniente para efectuar la práctica de laboratorio.

Las curvas obtenidas se efectuaron con el programa Wolfram Mathematica en el anexo E, se muestra la programación para las demás aletas.

### 3.4 POTENCIA REQUERIDA EN LA PLACA FUENTE DE CALOR.

La placa fuente de calor deberá ser capaz de cumplir los siguientes requisitos:

- Tiempo de calentamiento corto
- Temperatura en la base constante

Hay varias formas de calentar materiales una de ellas es el efecto Joule, el cual consiste en hacer circular corriente eléctrica en un material, el paso de corriente eléctrica provoca que parte de la energía cinética de los electrones se transforme en calor, las resistencias calefactoras cumplen con este principio y para el equipo de laboratorio estas resistencias deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Deben estar herméticamente selladas, para que no ingresen líquidos que puedan disminuir su vida útil.
- Deben resistir altas temperaturas
- No deben crear un ambiente corrosivo a altas temperaturas.

Entre las limitaciones se tiene que:

- Necesitan de un control de temperatura para funcionamiento continuo.
- Los agujeros donde van alojados los cartuchos deben tener un cierto grado de apriete.

Para resolver estos inconvenientes desde el programa de adquisición de datos se hace el control de los cartuchos calefactores, se tiene más información al respecto en el anexo F.

El apriete que se debe dar a los cartuchos está en función de su potencia.

### 3.4.1 CALCULO DE POTENCIA EN LA PLACA FUENTE

Se utiliza la ecuación 3.2 y se obtiene lo siguiente:

$$V = (0.12^2 * 0.02) = 2.88 * 10^{-4} [m^3]$$

$$\dot{E}_{almacenada} = \left( 2702 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * 2.88 * 10^{-4} [m^3] * 936.58 \left[ \frac{J}{kg * K} \right] \right) * \frac{dT_s}{dt}$$

$$\dot{E}_{almacenada} = 728.82 \left[ \frac{J}{K} \right] * \frac{dT_s}{dt}$$

Utilizando las ecuaciones 1.2; 1.6 y reemplazando en la ecuación 3.2 se tiene.

$$P_{req} [w] - 0.1285(T_s - 293) - 4.0824 * 10^{-11}(T_s^4 - 293^4) = 728.82 \left[ \frac{J}{K} \right] * \frac{dT_s}{dt}$$

Ahora se simula el comportamiento de la temperatura para diferentes potencias.

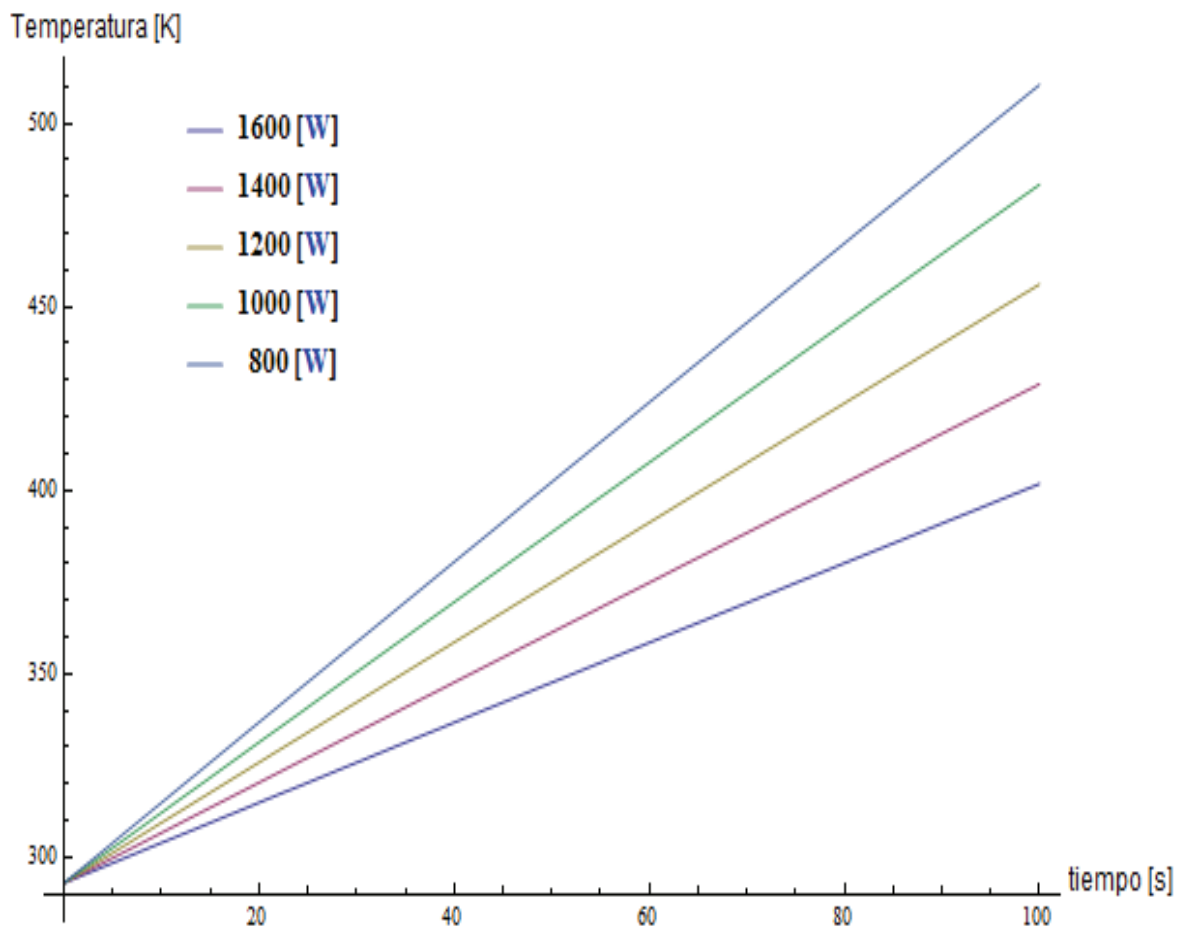


Figura 3. 7 Simulación con diferentes potencias

En la figura 3.7 se muestra el comportamiento de la temperatura a diferentes potencias, el tiempo disminuye; esto cumple con el parámetro de que las resistencias no deben estar en conexión continua a una fuente de energía eléctrica.

Se selecciona una potencia de 1200 [W], el tiempo que aproximadamente se tarda en llegar a 373 K es de 60 segundos.

### 3.4.2 Selección del cartucho calefactor

Para seleccionar el cartucho de toma en cuenta lo siguiente:

- Que el voltaje de funcionamiento sea de 120 V
- Que sea de dimensiones que se ajusten a la placa fuente de calor.

La tabla 3.1 muestra el catálogo de los diferentes cartuchos.



Tabla 3. 1 Tamaño para cartuchos calefactores (Watlow Heaters, 2013).

**Cartridge/Insertion Heaters**

**FIREROD Cartridge Heaters**

Heater Part Numbers

Diameter in.	Sheath Length in. (mm)	Watts	Watt Density W/in <sup>2</sup> (W/cm <sup>2</sup> )	Approx. Ref. WL in. (cm)	Part Number
3/8	120 (76.0)	120	89 (14)	0.12 (0.054)	J3A173
3/8	120 (76.0)	240	300	76 (12)	J3A73
3/8	120 (76.0)	400	104 (18)	0.12 (0.054)	J3A132
3/8	120 (76.0)	240	400	104 (18)	J3A29
3/8	120 (76.0)	500	129 (20)	0.12 (0.054)	J3A110
3/8	120 (76.0)	240	500	129 (20)	J3A111
3/8	120 (76.0)	600	154 (24)	0.12 (0.054)	J3A51
3/8	120 (76.0)	240	600	154 (24)	J3A127
3/8	120 (76.0)	750	193 (30)	0.12 (0.054)	J3A137
3/8	120 (76.0)	240	750	193 (30)	J3A112
3/8	120 (76.0)	1000	254 (39)	0.12 (0.054)	J3A79
3/2	120 (89.0)	250	54 (8)	0.14 (0.064)	J3J44
3/2	120 (89.0)	250	54 (8)	0.14 (0.064)	J3J64
3/2	120 (89.0)	350	75 (12)	0.14 (0.064)	J3J65
3/2	120 (89.0)	500	107 (17)	0.14 (0.064)	J3J45
3/2	120 (89.0)	240	500	107 (17)	J3J46
3/2	120 (89.0)	240	750	162 (25)	J3J63
4	120 (102.0)	150	28 (4)	0.15 (0.068)	J4A117
4	120 (102.0)	240	150	28 (4)	J4A122
4	120 (102.0)	250	46 (7)	0.15 (0.068)	J4A118
4	120 (102.0)	240	250	46 (7)	J4A90
4	120 (102.0)	300	56 (9)	0.15 (0.068)	J4A63
4	120 (102.0)	240	300	56 (9)	J4A26
4	120 (102.0)	350	65 (10)	0.15 (0.068)	J4A1
4	120 (102.0)	240	350	65 (10)	J4A103
4	120 (102.0)	400	74 (11)	0.15 (0.068)	J4A139
4	120 (102.0)	240	400	74 (11)	J4A88
4	120 (102.0)	500	92 (14)	0.15 (0.068)	J4A16

Cada uno de los cartuchos seleccionados tiene una potencia máxima de 400 [w] así que para obtener los 1200 [W] se seleccionan tres de estos cartuchos.

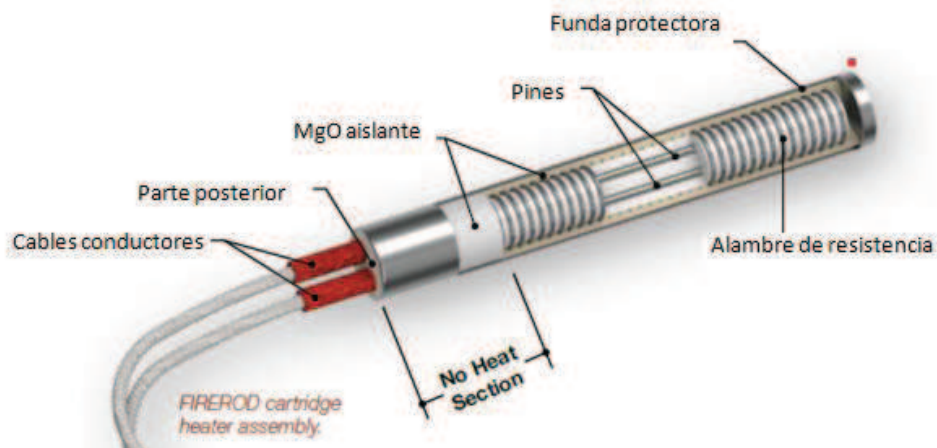


Figura 3. 8 Partes de un cartucho (Firerod Cartridge Header, 2013).

En la figura 3.8 se muestra el cartucho, cuyas especificaciones se encuentra en el anexo F.

### 3.4.3 Ajuste del cartucho calefactor

Para el cálculo de ajuste se necesita la densidad de Watt, en la tabla 3.1 se especifica que para el cartucho seleccionado la densidad de Watt es igual a  $74 \left[ \frac{w}{in^2} \right]$ , ahora en la figura 3.9 para una temperatura de 212°F nos indica que el espacio entre el cartucho y la placa fuente de calor es de 0.045 in así que el diámetro a maquinar en la placa fuente de calor será de:

$$\frac{1}{2} [in] + 0.045 [in] = 0.545 [in]$$

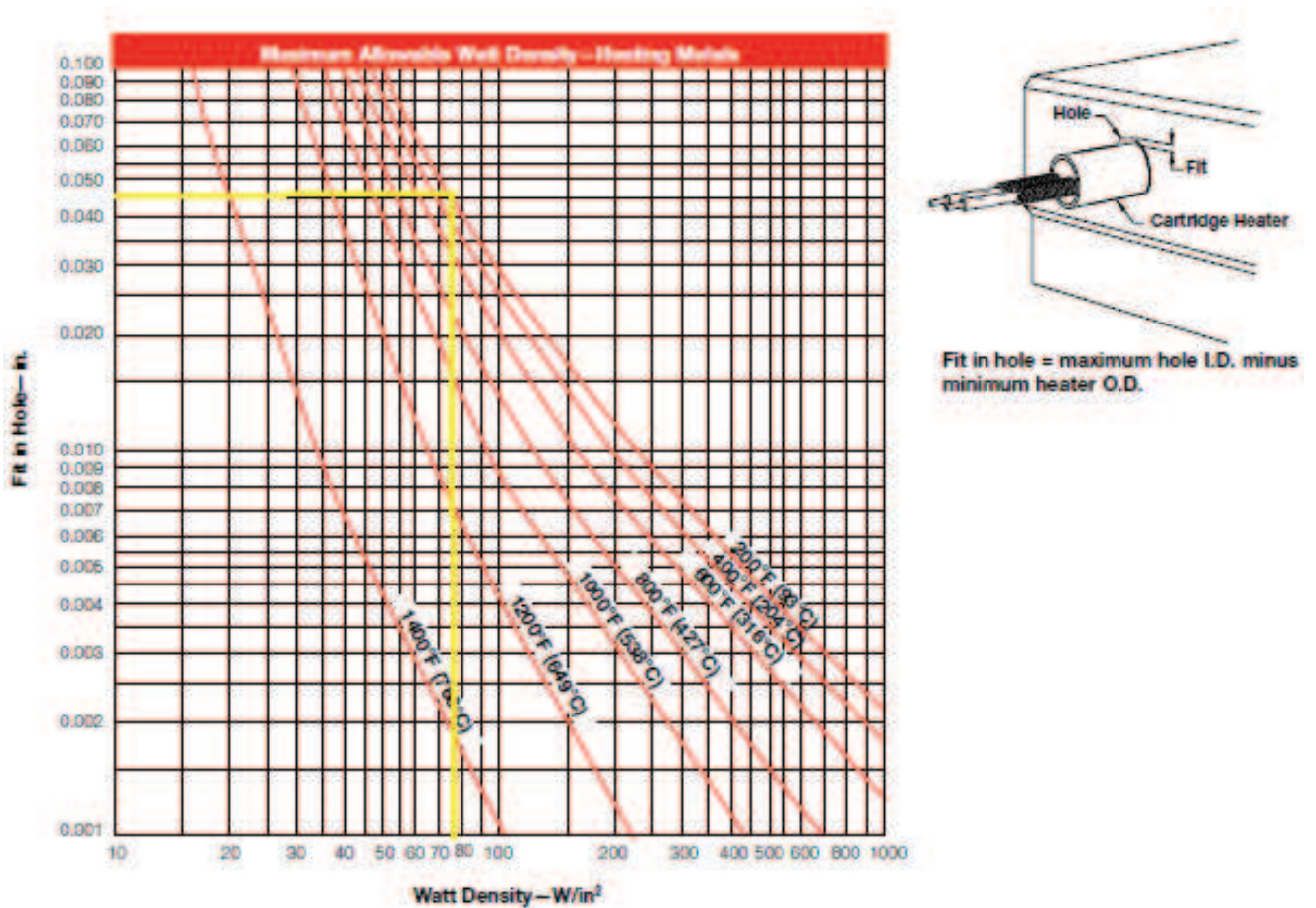


Figura 3. 9 Curvas para el ajuste de los cartuchos (Watlow Heaters, 2013).

### 3.4.4 Conexión de los cartuchos

Los cartuchos serán conectados en paralelo así se tendrá una menor resistencia y se podrá obtener una máxima potencia.

La resistencia medida por cada cartucho es:

$$R_{cart} = 35.6 [\Omega]$$

Sumando las resistencias en paralelo se tiene:

$$R_{E.total} = (3 * (35.6 [\Omega])^{-1})^{-1} = 11.86 [\Omega]$$

$$P_{elec} = \frac{(120 [v])^2}{11.86 [\Omega]} = 1210 [W] \approx 1200 [W]$$

### 3.5 SIMULACIÓN DE LAS ALETAS

Se utiliza el software basado en elementos finitos COMSOL 4.0, la presentación modelización y simulación De COMSOL 4.0 es una herramienta muy útil para modelar cualquier combinación de fenómenos térmicos.

El módulo “Heat Transfer Module” resuelve problemas que involucran la combinación de fenómenos como conducción, convección, y radiación. Este dispone de una librería que contiene una serie de materiales que pueden ser manipulados o bien pueden ser dejados ahí sin la necesidad de manipular las propiedades del material.

En el programa se ve el comportamiento de las aletas frente a una fuente de calor y se obtendrá los datos simulados que servirán posteriormente para la comparación con los datos experimentales.

#### 3.5.1 SIMULACIÓN Y OBTENCIÓN DE DATOS, ALETA DE ALUMINIO DE SECCIÓN CIRCULAR CONSTANTE

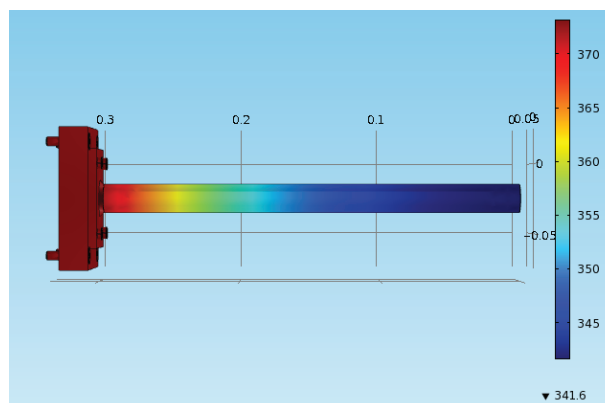


Figura 3. 10 Vista frontal, aleta de aluminio, simulación COMSOL 4.0

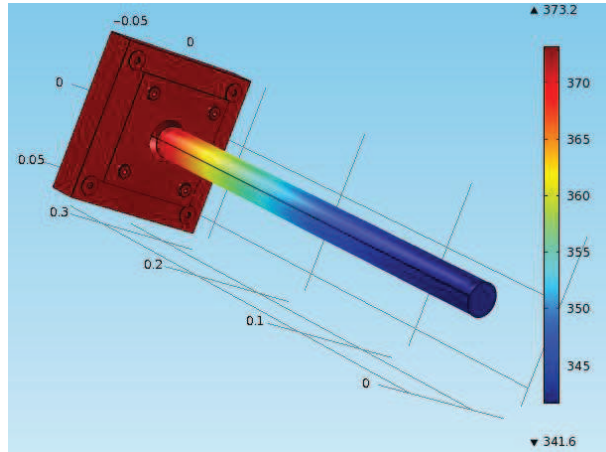


Figura 3. 11 Aleta de aluminio, simulación en COMSOL 4.0

En las figuras 3.10 y 3.11 se muestra que las regiones más oscuras son a aquellas que tienen mayor concentración de energía, la temperatura aproximada es de 373 K; en el extremo de la aleta se aprecia que la temperatura ha disminuido. En la figura 3.12 se muestra la curva de distribución de temperatura. El desarrollo en COMSOL 4.0 para las diferentes aletas se encuentra detallado en el anexo G.

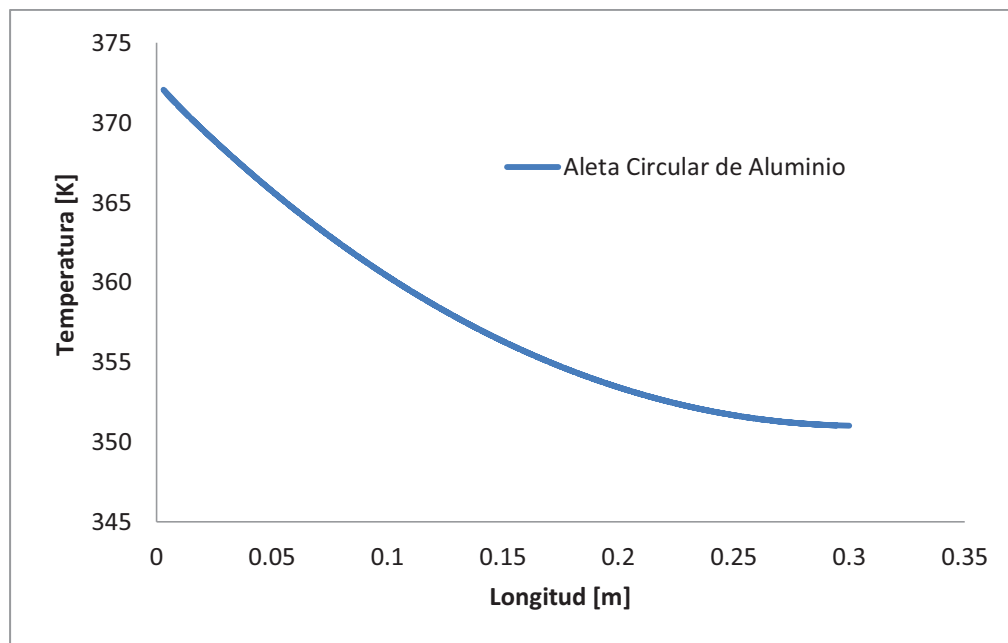


Figura 3. 12 Distribución de temperaturas aleta circular de aluminio

### 3.5.2 SIMULACIÓN Y OBTENCIÓN DE DATOS, ALETA DE ACERO DE SECCIÓN CIRCULAR CONSTANTE

En las Figuras 3.13, 3.14 y 3.15 se aprecia que la temperatura decrece al aumentar la longitud, estos valores llegan hasta los 315 K. A partir de los 20 cm de longitud los cambios de temperatura a lo largo de la aleta son menores, los valores máximos de variación de temperatura se observan al inicio de la aleta.

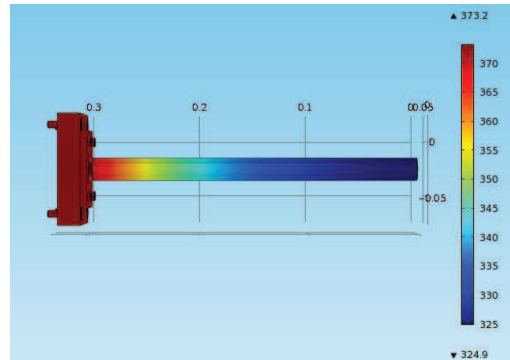


Figura 3.13 Vista lateral, aleta de acero, simulación en CONSOL 4.0

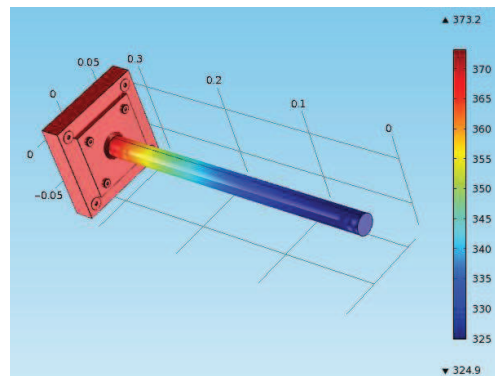


Figura 3.14 Aleta de acero, simulación en COMSOL 4.0

Distribución de temperatura

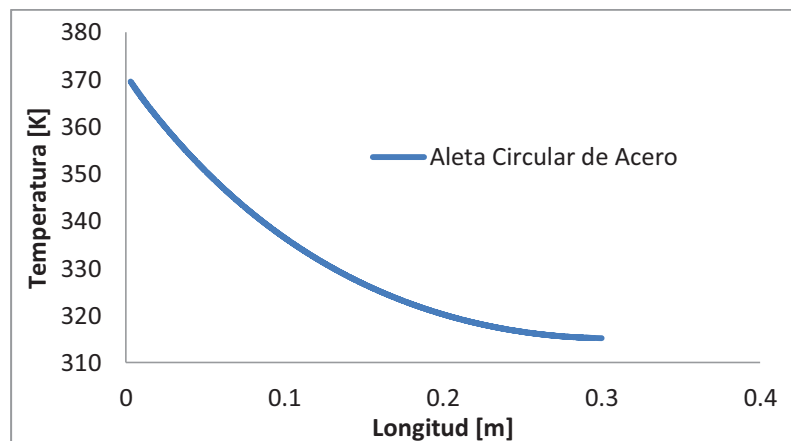


Figura 3.15 Distribución de temperatura, aleta circular de acero

### 3.5.3 SIMULACIÓN Y OBTENCIÓN DE DATOS, ALETA DE ACERO TRIANGULAR

En las figuras 3.16, 3.17 y 3.18 se observa que la distribución de temperatura se aproxima a una recta, al igual que las aletas anteriores la concentración de energía se encuentra al inicio de la aleta.

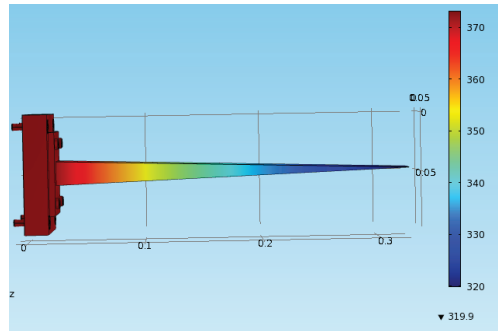


Figura 3. 16 Vista lateral, aleta triangular de acero, simulación en COMSOL 4.0

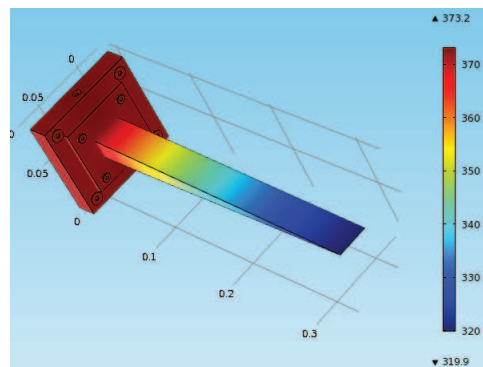


Figura 3. 17 Aleta triangular de acero, simulación en COMSOL 4.0

Distribución de temperatura

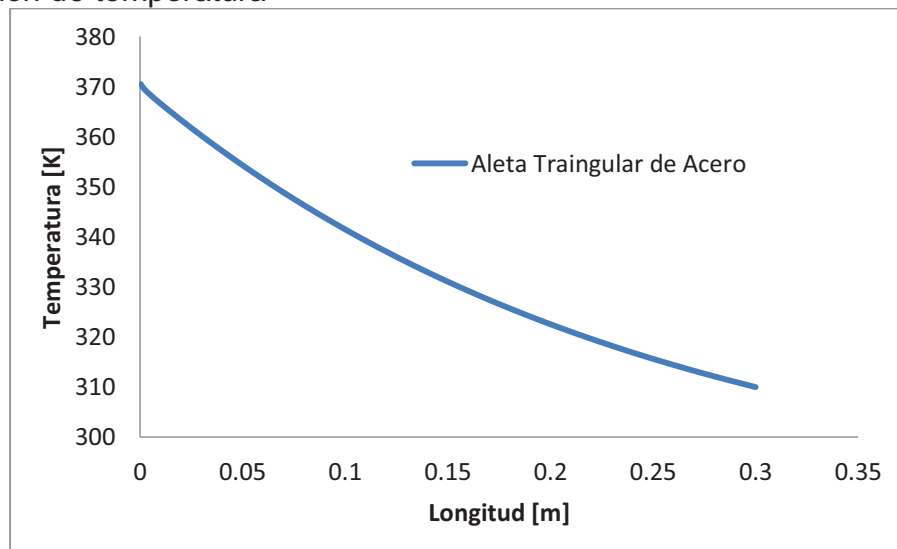


Figura 3. 18 Distribución de temperatura, aleta triangular de acero

En la figura 3.19 se observa que la aleta de sección circular constante de aluminio es más eficiente, seguida de la aleta triangular de acero.

A pesar de estar expuestas a la misma temperatura base la distribución de temperaturas es diferente debido al tipo de material y geometría utilizada. En el caso de las aletas de sección circular constante se observa que el material influye significativamente en la distribución de temperatura. Al considerar la aleta triangular de acero y la aleta de sección circular de acero se observa que la curva de distribución de temperatura varía ya no por el material utilizado si no por la forma geométrica.

Esto muestra que para optimizar procesos en los que se utilicen aletas los parámetros principales a considerar serán el tipo de material utilizado y la geometría de las mismas.

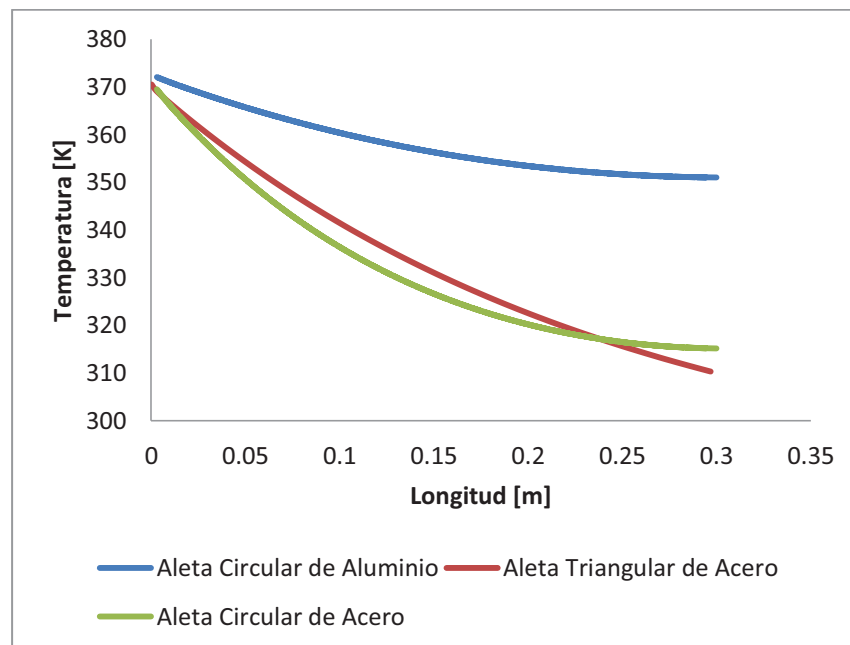


Figura 3. 19 Curvas de distribución de temperaturas

### 3.6 PROGRAMACIÓN EN LABVIEW

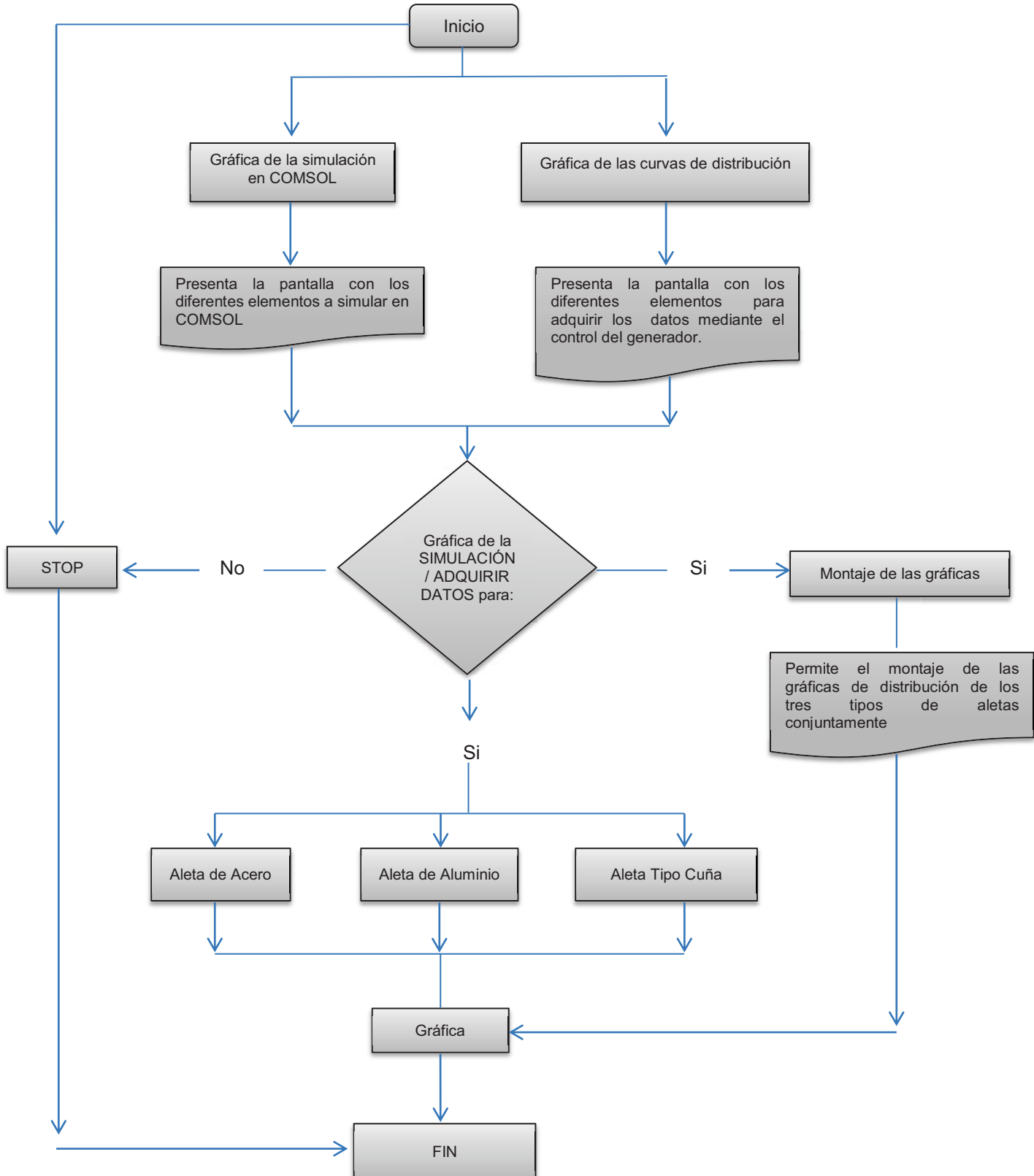
LabView (Laboratory Virtual Instrumentacion Engineering Workbench) es una plataforma y entorno para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico, es ideal para el control y simulación de procesos. El lenguaje de programación se llama lenguaje G, donde la G simboliza lenguaje gráfico.

Lo que se logra con este tipo de programación es la adquisición y el control de la temperatura.



### 3.6.1 ESTRUCTURA DE FUNCIONAMIENTO

El diagrama de flujo general del sistema de control permite tener una visión de programación lógica y coherente.





### 3.6.2 SELECCIÓN DE LA TERMOCUPLA

La termocupla también conocida como termopar, es un Transductor capaz de convertir un tipo determinado de energía en otro de salida, está formado por la unión de dos metales de distinta naturaleza, que a través del efecto Seebeck permite censar una temperatura. Cuando una corriente pasa por dos metales semiconductores, la corriente propicia una transferencia de calor mientras la una se enfría la otra se calienta, consecuencia de esta diferencia de temperatura, se genera un voltaje, voltaje que puede ser registrado. En la tabla 3.2 se enlistan las ventajas y desventajas de las termocuplas.

Tabla 3. 2 Tipos de termocuplas

<b>TERMOCUPLAS</b>		
<b>TIPO</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>B</b>	Presenta una mayor estabilidad y resistencia mecánica, su rango de temperatura esta hasta los 1700 °C, es útil en atmósferas inertes u oxidantes.	No es adecuada en atmosferas reductoras (como hidrogeno o monóxido de carbono)
<b>R</b>	Son útiles para el uso constante en atmosferas oxidantes o inertes hasta 1400 °C	No es apta en atmósferas reductoras, ni en aquellas que contienen vapores metálicos, u oxidante.
<b>S</b>	Útiles en atmosferas oxidantes o inertes y en vacío hasta 760 °C	Poseen las mismas limitaciones que la termocupla Tipo R y Tipo B, en vacío pueden ser menos estables que la tipo B.
<b>T</b>	De uso adecuado en atmósferas en vacío y oxidantes reductoras e inertes, su límite máximo de temperatura es de 370°C para un diámetro de 3.25mm, es adecuada para mediciones bajo cero	Difíciles de encontrar

<b>E</b>	Su desempeño es satisfactorio en atmósferas oxidantes e inertes, y resultan particularmente adecuadas en atmósferas húmedas, son convenientes a temperaturas bajo cero.	Difíciles de encontrar
<b>J</b>	Es conocida como la termocupla hierro constantan, es la segunda más utilizada, útiles en usos continuos en atmosferas oxidantes, reductoras e inertes, hasta una temperatura de 760 °C.	Su uso no es recomendable en atmosferas sulfurosas, bajo temperaturas menores a los 0 °C, no es recomendable para valores por encima de los 760 °C.
<b>K</b>	Esta termocupla es la más utilizada en la industria, debido a su mayor capacidad de resistir más altas temperaturas. La Termocuplas Tipo K puede utilizarse de forma continua en ambientes oxidantes e inertes hasta 1260 °C.	Necesitan ser calibradas para procesos de automatización

Un análisis comparativo permite seleccionar la termocupla más ideal para el equipo de laboratorio.

Tabla 3. 3 Análisis de alternativas para la selección de la termocupla

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS								
ITEN	TERMOCUPLAS							IDEAL
	B	R	S	T	E	J	K	
<b>PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO</b>	18	18	19	20	19	20	20	20
<b>ADAPTABILIDAD</b>	20	20	20	15	20	30	35	40
<b>FACILIDAD DE INSTALACIÓN</b>	20	15	20	20	20	25	25	30
<b>COSTOS</b>	8	8	7	8	8	9	10	10
<b>TOTAL</b>	66	61	66	63	67	84	90	100
<b>PORCENTAJE</b>	0,66	0,61	0,66	0,63	0,67	0,84	0,9	1

Se selecciona la termocupla tipo K debido a que presenta la mayor calificación mostrada en la tabla 3.3. Su especificación técnica se encuentra en el anexo H.

### 3.6.3 SELECCIÓN DEL ADQUISIDOR DE DATOS

La tarjeta de adquisición seleccionada es la NI USB-6009 de la NATIONAL INSTRUMENTS, figura 3.20, permite adquirir una señal o dato del mundo real (sistema analógico), para su posterior digitalización, y manipulación por un ordenador.



Figura 3. 20 Tarjeta de adquisición NI USB 6009 (Instruments, 2013)

La tarjeta 6009 permite el ingreso de 4 señales analógicas, en este caso 4 termocuplas, también nos permitirá hacer el control de temperatura con las salidas digitales. Anexo I

### 3.6.4 CIRCUITO DE ACOPLAMIENTO

Esta tarjeta requiere un circuito integrado amplificador, esto sucede debido a que: La USB-6009 tiene 14-bit de resolución con un mínimo de rango de +/- 1 volt. Esto da una resolución de 480 y 122 micro volts, La respuesta estimada de los diferentes tipos de termocuplas está en:

- Tipo K: 41 microVolts por grado Celsius
- Tipo J: 56 microVolts por grado Celsius
- Tipo T: 52 microVolts por grado Celsius

Por lo tanto la USB-S6009 solo puede medir cambios de aproximadamente 2-3 grados Celsius dependiendo del tipo de termocupla que se esté utilizando.

La solución es usar un amplificador operacional para detectar la señal de la termocupla ya que este voltaje es demasiado pequeño para detectarlo con la DAQ6009.

Un amplificador operacional, es un circuito electrónico integrado que tiene dos entradas y una salida. La salida es la diferencia de las dos entradas multiplicada por un factor de ganancia.

La selección del amplificador operacional está relacionada con el tipo de termocupla. Para la termocupla tipo K se usa el circuito integrado de amplificación AD595 mostrado en la figura 3.21.

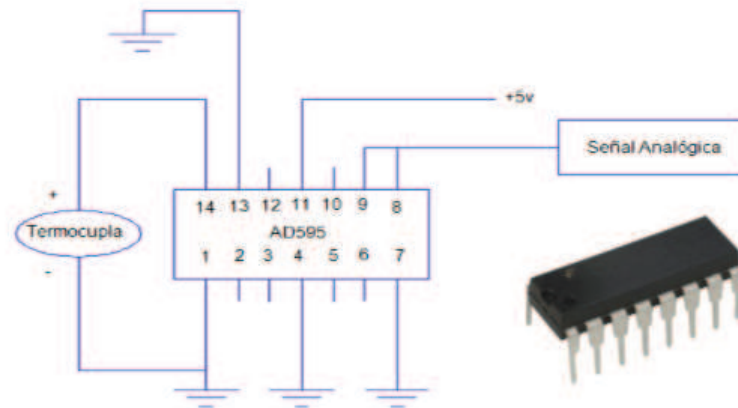


Figura 3. 21 Conexión del amplificador operacional

### 3.6.5 INTERFAZ DE PRESENTACIÓN

A través de esta pantalla, figura 3.2, se podrán ingresar a los diferentes módulos del programa, cargando cada interfaz para realizar el estudio de transferencia de calor. La descripción detallada de cada módulo y sus principales comandos para su programación se encuentra en anexo J.

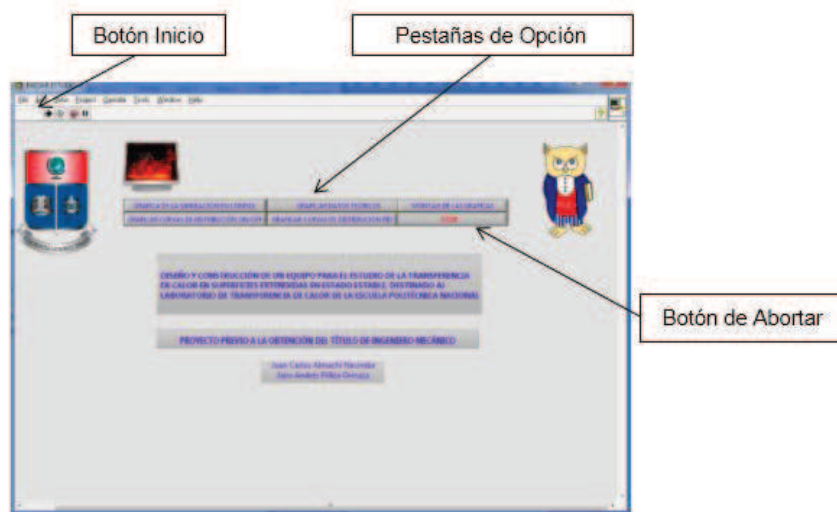


Figura 3. 22 Interfaz de presentación

## CAPÍTULO IV.

### CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL EQUIPO

En este capítulo se describe el proceso de construcción del equipo de superficies extendidas en estado estable. Una vez que fueron dimensionados los distintos elementos del equipo se elaboraron los planos y listas de materiales requeridos. Para la construcción se utilizaron procesos conocidos en nuestro medio como: soldadura, corte, torneado, limado, pulido, pintado, etc., los cuales fueron ejecutados en los distintos laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional.

#### 4.1 CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

En la tabla 4.1 se enlista los elementos principales que componen el equipo de superficies extendidas. Se describe brevemente el material, dimensiones y el origen por el cual se los obtuvo. El equipo se construirá a partir de los planos que se presentan en el anexo K.

Tabla 4. 1 Elementos del equipo

Nº ELEM	NOMBRE	MATERIAL	DIMENSIONES mm	CANT POR UNIDAD	ORIGEN
1	Escritorio	Madera	----	1	Corte, taladrado, pulido y pintura
2	Estructura de soporte	Acero	----	1	Corte, taladrado, soldadura, pintado
3	Placa generadora de calor	Aluminio	1200*1200*20	1	Corte, limado, taladrado y pulido
4	Cartuchos	Acero	φ12,7*100	4	Comprado

5	Base de aleta	Acero	80*80*5	2	Corte, limado, taladrado y pulido
6	Base de aleta	Aluminio	80*80*5	1	Corte, limado, taladrado y pulido
7	Aleta circular	Acero	$\phi 20 \times 300$	1	Corte, torneado, pulido y taladrado
8	Aleta circular	Aluminio	$\phi 20 \times 301$	1	Corte, torneado, pulido y taladrado
9	Aleta triangular	Acero	---	1	Corte, limado, pulido y taladrado
10	Tarjeta de adquisición	---	---	1	Comprado
11	Circuito amplificador	---	---	4	Diseño e impresión del circuito
12	Circuito de control	---	---	1	Diseño e impresión del circuito
13	Tapas	Madera	---	4	Comprado
14	Pulsadores	Plástico	---	2	Comprado
15	Borneras	Plástico	---	20	Comprado
16	Termocuplas	---	---	4	Comprado
17	Relé de baja	Plástico	----	1	Comprado
18	Relé de Altas	Plástico	----	1	Comprado
19	Transformador de 120v a 5v	---	----	1	Comprado
20	Transformador de 120v a 12v	---	----	1	Comprado

La tabla 4.2 presenta una lista de los materiales e insumos requeridos para la elaboración del equipo de superficies extendidas. Los precios que se enlistan son los valores totales de cada uno de los elementos.

**Tabla 4. 2 Materiales e insumos requeridos**

N° ELEM	ESPECIFICACIÓN DEL MATERIAL	DIMENSIONES	N ELEMS. REQS.	VALOR	
				UNIT	TOTAL
1	Planchas de madera	1.2*3*0.01 m	3	25	75
2	Placa de Aluminio	17*17*2.2 cm	1	40	40
3	Plancha de Acero	8.5*8.5 *0.5 cm	2	3	6
4	Plancha de Aluminio	8.5*8.5*0.5 cm	1	6	6
5	Eje de acero	Φ12.7*350mm	1	10	10
6	Eje de Aluminio	Φ12.7*350mm	1	18.50	18.50
7	Barra de acero rectangular	3*3*35 cm	1	14	14
8	Perfiles de acero	2L*300 cm	3	10	30
9	Material de aporte de aluminio y acero	---	2	10	20
10	Perfil L	1*1*1/8	1	30	30
11	Electrodo E 6011	---	3	1	3
12	Broca par acero	Φ 12.4 mm	1	8	8
13	Broca	Φ 8 mm	1	5	5
14	Tornillos de madera	---	30	10	3
15	Lijas de acero	---	8	0.50	4
16	Lijas de madera	---	8	0.50	4
17	Pintura varios colores	¼ de galón	3	25	75
18	Bisagras	---	5	0.20	1
19	Material de aporte de acero y aluminio para la soldadura	---	2	10	20
20	Pasta térmica	---	1	4	4
21	Alambre Varias medidas	---	5	0.25	1.25
22	Tornillo allen fresado con su respectiva tuerca y arandela	Φ6*30 mm	4	0.25	1
23	Tornillo allen cilíndrico	Φ5*25	4	0.20	0.80
24	Baquelitas perforadas	15cm*9cm	2	2	4

25	Borneras	---	20	0.20	4
26	AD 595	---	4	23	92
27	Termocuplas tipo K	---	4	15	60
28	AD 6009	---	1	150	150
29	Trasformadores	---	2	15	30
30	Cajas de proyectos	---	2	10	20
31	Varios materiales electrónicos	---	--	10	10
TOTAL					729 USD

## 4.2 DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES Y ACTIVIDADES A REALIZAR

Para la construcción del equipo de superficies extendidas se realiza las siguientes operaciones:

### 4.2.1 ESCRITORIO

Se usó los siguientes procesos para la construcción:

#### *Preparación de la madera para la estructura del escritorio*

Para la preparación de la madera que conformará la estructura del equipo se procede a marcar las dimensiones aparentes en el larguero. Una vez marcadas las dimensiones del mueble se procede al corte.

#### *Corte*

Mediante la utilización de una cierra de disco se procede a cortar la madera de acuerdo a las dimensiones marcadas en la preparación.

#### *Limpieza*

En este proceso mediante la utilización de una cantidora se procede a planear dos caras continuas del larguero, con la finalidad de escuadrar al material.

#### *Dimensionamiento*

Una vez escuadrado el material se procede en la cierra de disco y en la caladora a cortar el material bajo sus dimensiones específicas largo ancho y altura, tomando como referencia siempre los lados escuadrados del material para proporcionar paralelismo entre las caras del material.

#### *Espigado*

Una vez cortado el material bajo sus dimensiones, se procede en la cierra de disco o en la caladora a realizar las espigas en los maderos que serán los



travesaños, en los maderos que serán las columnas se procede a realizar un vaciado del tamaño de la espiga (ancho y profundidad).

#### *Armado de la estructura.*

Con goma, clavos, y una prensa manual, se procede al armado de la estructura, esto se lleva acabo poniendo goma en cada orificio, para luego con la ayuda de un clavo y la prensa sujetar los extremos de la unión entre la espiga y el alojamiento, este proceso se repite para cada uno de los nodos del mueble.

#### *Forrado del escritorio.*

Cuando ya se ha secado la estructura, se procede a cuadrar el mueble, para luego poder forrarlo con triplex, madera contrachapada.

#### *Preparación del acabado superficial*

Una vez ya armado el escritorio se procede a limpiar su estructura mediante la utilización de lijas, masilla y sellador, para poder conseguir un acabado superficial muy liso.

#### *Pintura.*

Ya preparada la superficie del escritorio se procede a la etapa de pintado y lacado está mejorara la presentación del escritorio y protegerá al mueble contra el ambiente.



**Figura 4. 1 Escritorio**

Se obtiene el escritorio presentado en la figura 4.1.

#### **4.2.2 ESTRUCTURA**

Proceso para la elaboración de la estructura, figura 4.2.

#### *Trazado*

Empieza con la preparación del perfil L 1x1x1/8 a las dimensiones adecuadas.

### *Corte*

Una vez trazadas estas dimensiones en el perfil, se procede a cortar el material con la ayuda de una cierra de arco, o una amoladora con disco de corte.

### *Biselado*

Hay que limpiar la rebaba remanente en cada extremo del perfil, posterior a esto se escuadra cada uno de sus extremos, procurando formen entre estos 90 grados.

### *Sujeción*

Con la ayuda de la entenalla se sujeta los extremos de este perfil, y se realiza puntos de suelda, en cada uno de sus extremos, armando parcialmente la estructura.

### *Soldado*

Ya una vez sujeta la estructura por pequeños puntos de suelda, se procede a realizar cordones más largos de soldadura, para reafirmar la estructura.

### *Pulido*

En las uniones antes soldadas con ayuda de la amoladora, se procede a limpiar el exceso de soldadura.

### *Pintado*

Una vez limpia cada unión, se pinta la estructura con ayuda de un compresor y la pistola, para proteger a la estructura del ambiente, y mejorar su estética.



Figura 4. 2 Estructura de sujeción de la placa fuente de calor

## **4.2.3 PLACA FUENTE DE CALOR**

Para la construcción de la placa fuente de calor, figura 4.3, se necesitó los siguientes procesos:

### *Cortar la plancha de aluminio*

Esta operación consiste en cortar la plancha de aluminio de dos centímetros de espesor en un pedazo cuadrado de 17x17 cm con el proceso de corte por plasma, el cual deja un acabado superficial de baja calidad.

### *Limado*

Se utiliza una limadora mecánica la cual hace un arranque de viruta por medio de un útil de acero. La mesa que sujeta a la placa de aluminio es perpendicular al útil de acero que con su movimiento horizontal permite el arranque de viruta.

Los primeros pasos son de desbaste estos se realizan con una profundidad de 1.5 mm y un avance de 2 mm esta operación se las realiza a los cuatro lados laterales de la placa de aluminio. Luego con un profundidad de 0.5 mm y un avance de 0.5mm se repite el proceso anterior hasta dejar a la placa de aluminio de 12x12 cm. Este último paso deja un acabado superficial de gama media.

### *Taladrado*

Con ayuda de una fresadora se procede a hacer los agujeros especificados en los planos. Se utiliza una fresadora debido a que la vibración horizontal de la misma es menor a un taladro común.

### *Pulido*

Con ayuda de un cepillo metálico circular conectado en un esmeril se procede a quitar todas las rebabas provocadas por los procesos anteriores, luego con ayuda de una lija de agua se procede a pulir toda la superficie.



**Figura 4. 3 Placa fuente de calor**

#### 4.2.4 ALETAS DE SECCIÓN CIRCULAR CONSTANTE

Se realizó los siguientes procesos para obtener este tipo de aleta, figura 4.4.

##### *Corte*

Se procede a cortar las placas de acero y de aluminio con dimensiones de 8.5\*8.5 cm con ayuda de una cizalladora mecánica.

##### *Limado*

Con ayuda de la limadora mecánica se procede a limar los lados laterales hasta dejarlas de las medidas especificadas. El acabado superficial será de gama media; las dimensiones se encuentran especificadas en los planos

##### *Taladrado*

Se procede a realizar los agujeros indicados en los planos con ayuda de un taladro de pedestal.

##### *Torneado*

Esta operación consiste en arrancar viruta de las superficies cilíndricas de los ejes tanto de acero como de aluminio. Para llegar a las dimensiones especificadas en los planos se procede a hacer varias pasadas de arranque de viruta, la calidad del acabado superficial será de gama media.

##### *Soldar la base con el eje*

Se procede biselar el eje y se procese a unir la base 8\*8cm con el eje; con ayuda de la soldadora tipo GMAW . El electrodo utilizado fue de tungsteno con un material de aporte de acero al 5% de manganeso para el caso de la aleta de acero. Para el aluminio el material de aporte es aluminio al 5% se silicio.

##### *Taladrado horizontal*

Esta operación consiste en hacer los alojamientos donde van introducidas las termocuplas, esto se realiza con el taladro de pedestal.

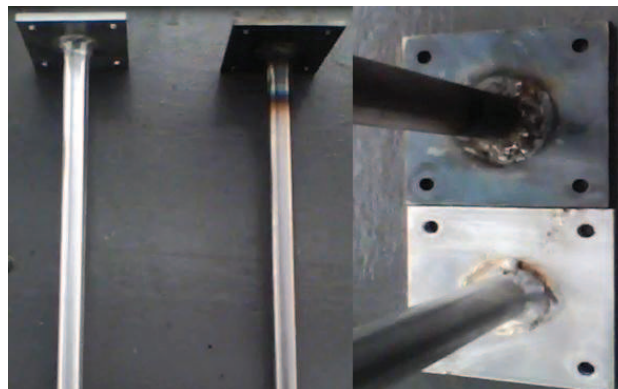


Figura 4. 4 Aletas de sección circular constante de acero y aluminio

#### 4.2.5 ALTEA TRIANGULAR DE ACERO

Los procesos de limado y taladrado y soldadura son los mismos que se mencionó en el apartado anterior.

El perfil triangular de la aleta se obtuvo limándola de acuerdo a las especificaciones de los planos, figura 4.5. Este proceso se lo realizó con la limadora mecánica.

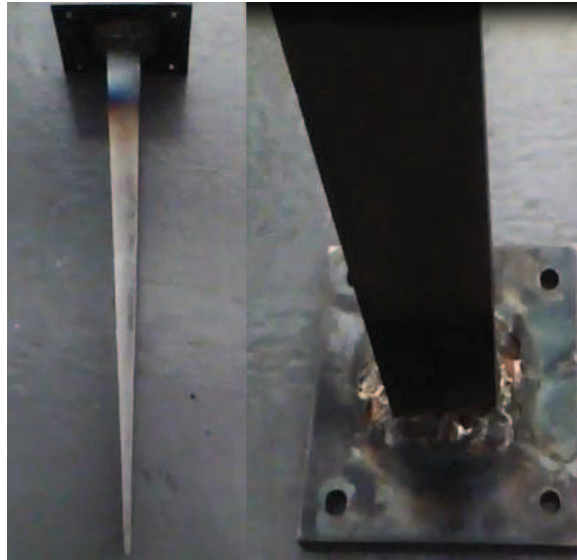


Figura 4. 5 Aleta triangular de acero

#### 4.3 ACOPLAMIENTO DE LOS CARTUCHOS CALEFACTORES CON LA PLACA FUENTE DE CALOR

Este proceso, figura 4.6, consiste en introducir los cartuchos calefactores en los alojamientos de la placa fuente de calor. El fabricante recomienda introducirlos con un grado de apriete, para obtener un ajuste adecuado se limita el uso de lubricantes y se utilizara pasta térmica, la misma que ayuda a que la transferencia de calor entre la placa fuente de calor y los cartuchos mejore.

Se baña todo el cartucho calefactor con pasta térmica y se procede a introducir a la placa fuente de calor haciendo movimientos circulares y empujándolos al mismo tiempo. Si este proceso se torna extremadamente duro se utiliza un martillo de goma y se lo golpea cuidadosamente la base del cartucho teniendo cuidado con los cables.

Una vez introducidos los cartuchos se procede a sellarlos con silicona de alta resistencia térmica.

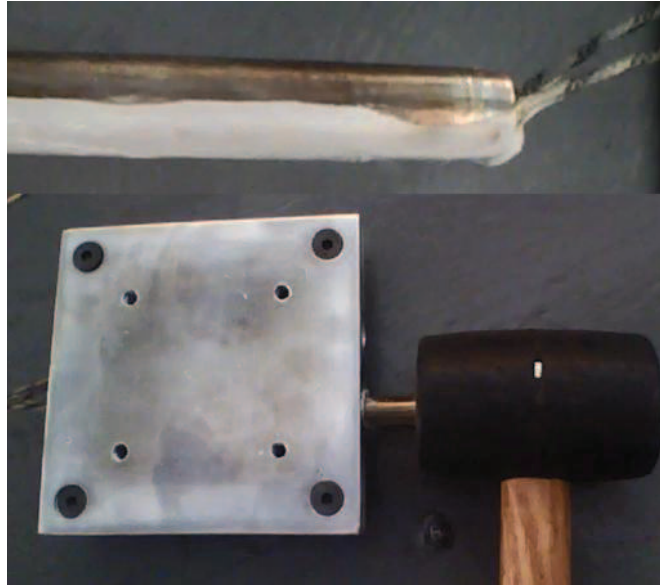


Figura 4. 6 Montaje de los cartuchos calefactores

#### 4.4 CIRCUITO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El circuito de adquisición de datos está compuesto por las termocuplas tipo K, amplificadores operacionales AD 595, y fuentes de 120V a 5V. El montaje de las mismas se debe hacer con guantes de látex los mismos que ayudan a que la energía electrostática del cuerpo humano no pase a los amplificadores de señal y quemen al AD 595. La conexión de los distintos elementos electrónicos, figura 4.7, se hizo mediante el proceso de soldadura blanda. El mismo que utiliza un soldador de estaño (cautín) y fundente o pasta limpiadora. El circuito a construir se muestra en la figura 4.8.

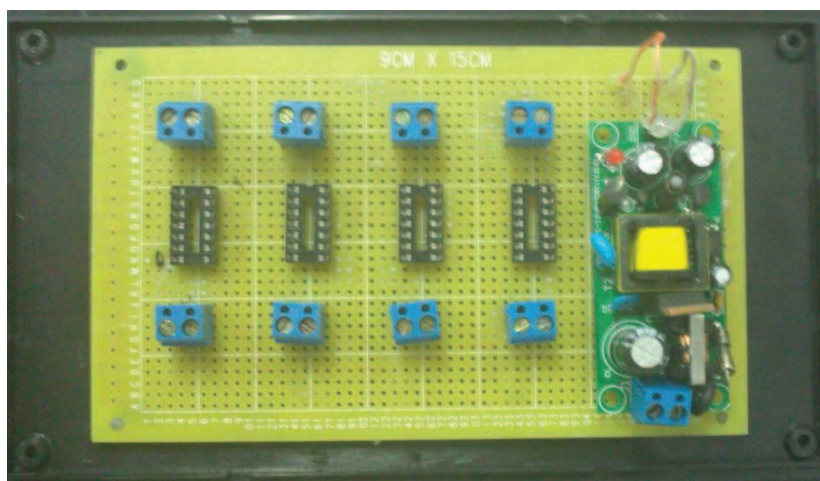


Figura 4. 7 Amplificador de datos



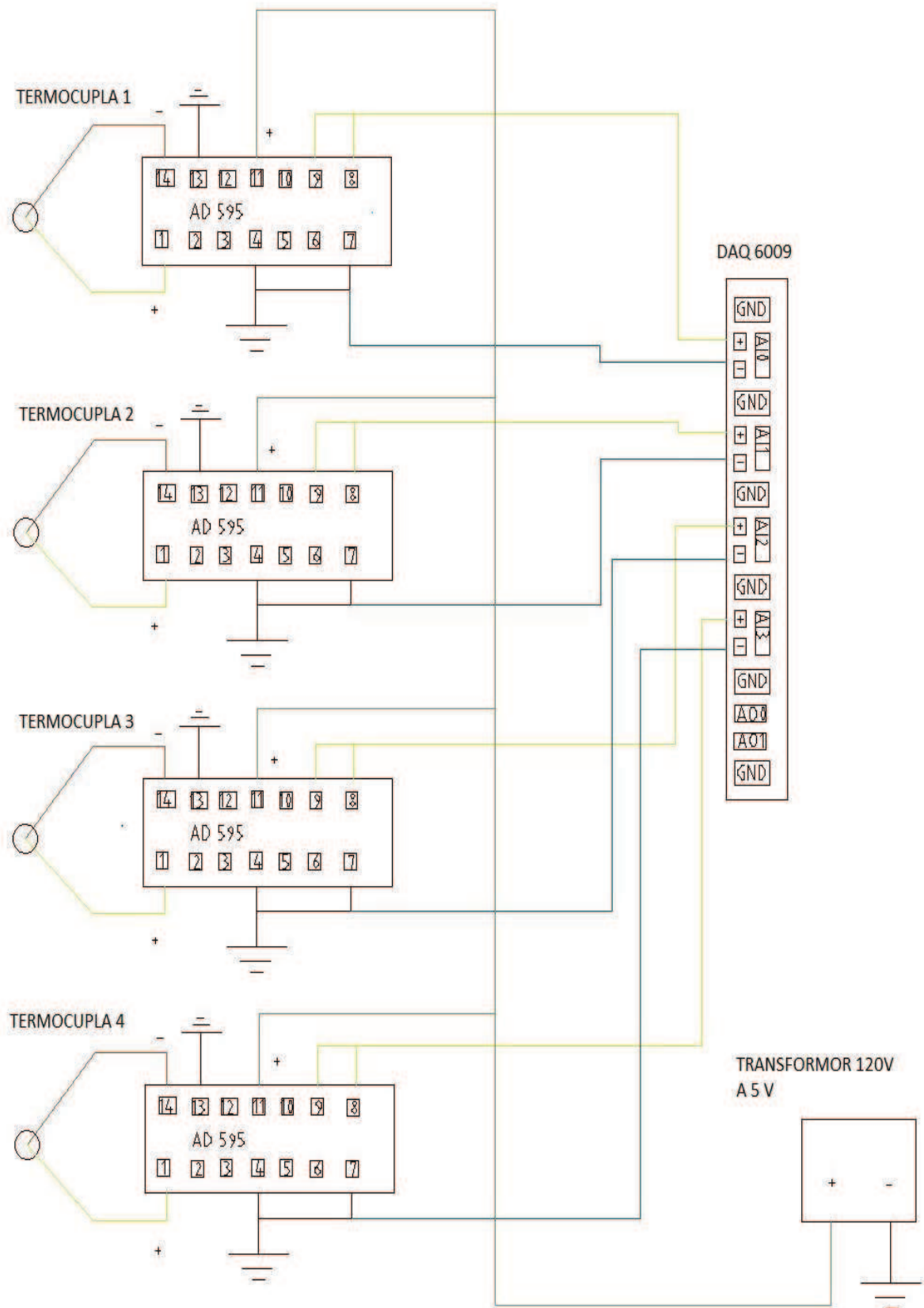


Figura 4. 8 Circuito amplificador de datos

#### 4.5 CIRCUITO DE CONTROL DE TEMPERATURA

El circuito de control sirve para prender y apagar los cartuchos calefactores. Una de las termocuplas censa la temperatura y mediante el programa de LabView y la DAQ 6009 hace el control de las mismas. Debido a que la DAQ 6009 tiene salidas analógicas de 5v se hace necesario usar relés eléctricos, figura 4.10, los mismos que separan al circuito de alto voltaje con el de bajo voltaje.

Se sigue el siguiente esquema, figura 4.9, para la conexión de los distintos elementos que sirven para el control y el proceso a utilizar es la soldadura blanda.

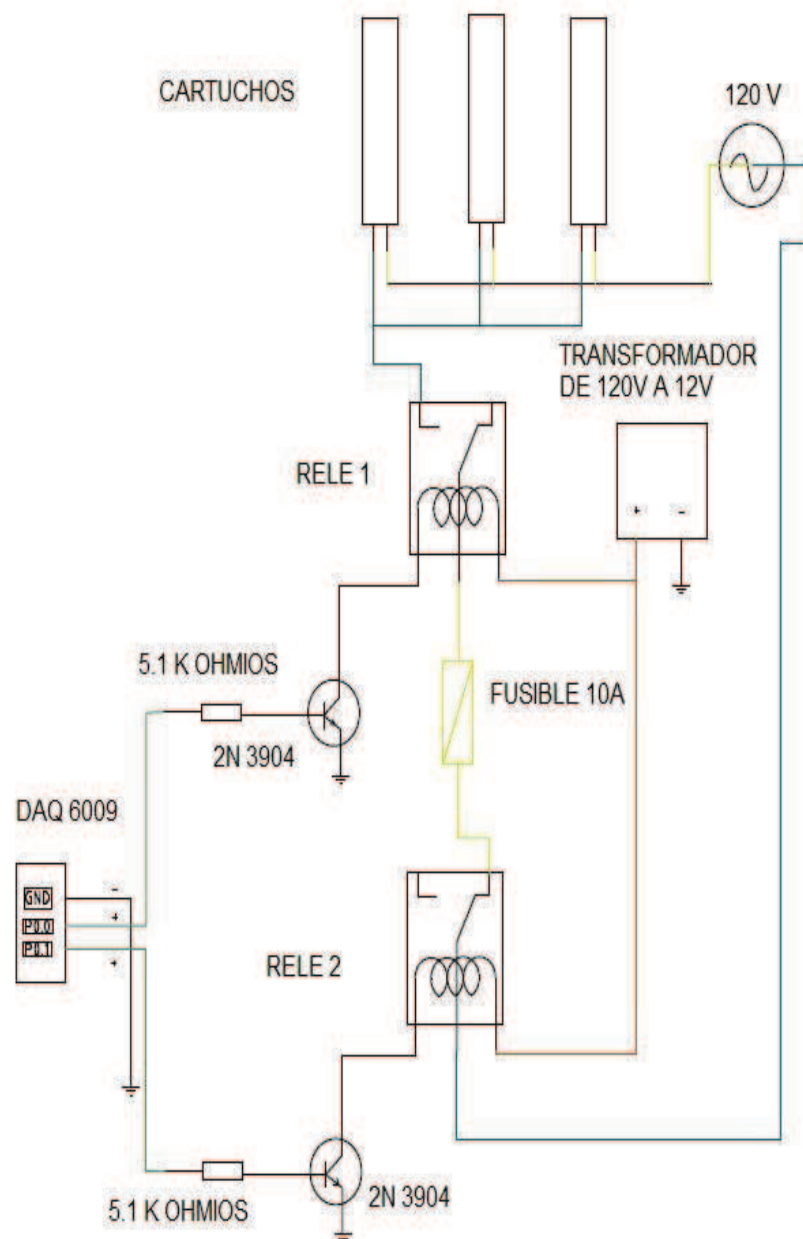
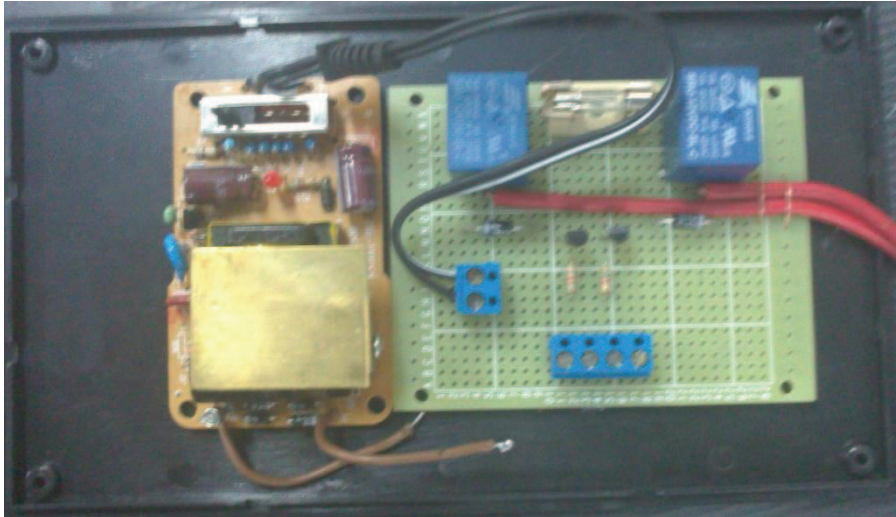


Figura 4. 9 Circuito de control de temperatura





**Figura 4. 10 Control de temperatura**

Con los pasos seguidos anteriormente se obtiene el equipo de superficies extendidas totalmente en estado operativo, figura 4.11.



**Figura 4. 11 Equipo de superficies extendidas**

## CAPÍTULO V.

### PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez construido el equipo de superficies extendidas se procede a hacer las pruebas de funcionamiento del equipo. Luego acondicionando el registro de datos se hace su adquisición para su posterior análisis y comparación con los datos teóricos y simulados.

#### 5.1 PRUEBAS

El equipo de superficies extendidas para el laboratorio de transferencia de calor permite el estudio de la distribución de temperatura en tres aletas de distintos materiales y diferente geometría.

Mediante las pruebas se observa cómo varía la temperatura en diferentes posiciones así como también permite observar cómo influye la transferencia de energía calorífica en diferentes materiales y geometrías.

##### 5.1.1 ACONDICIONAMIENTO DEL REGISTRO DE DATOS

Las señales que emiten las termocuplas tipo K, tabla 5.1, van en un orden de mV, estos son amplificadas con ayuda del AD 595. Sin embargo debido al uso de soldadura blanda se obtienen pérdidas de voltaje que dan datos erróneos a la DAQ 6009; este porcentaje de error se corrige con un factor de acondicionamiento que es implantado en el programa del equipo.

Tabla 5. 1 Acondicionamiento de la termocupla

DATOS DEL FABRICANTE		DATOS OBTENIDOS	
TEMPERATURA [°C]	mV	TEMPERATURA [°C]	mV
2	0.022	2	0,03
10	0,101	10	0,1
20	0,2	20	0,2
25	0,25	25	0,25
30	0,3	30	0,31
40	0,401	40	0,42

50	0,503	50	0,52
60	0,605	60	0,62
80	0,81	80	0,85
100	1,015	100	1,02
120	1,219	120	1,3
140	1,42	140	1,47
160	1,62	160	1,72
180	1,817	180	1,95

Con una regresión lineal, figura 5.1, de los datos obtenidos se eliminan las pequeñas fluctuaciones provocadas por la soldadura blanda. Con esto se tiene un registro de datos más uniforme. Los datos del fabricante se encuentran en el Anexo L.

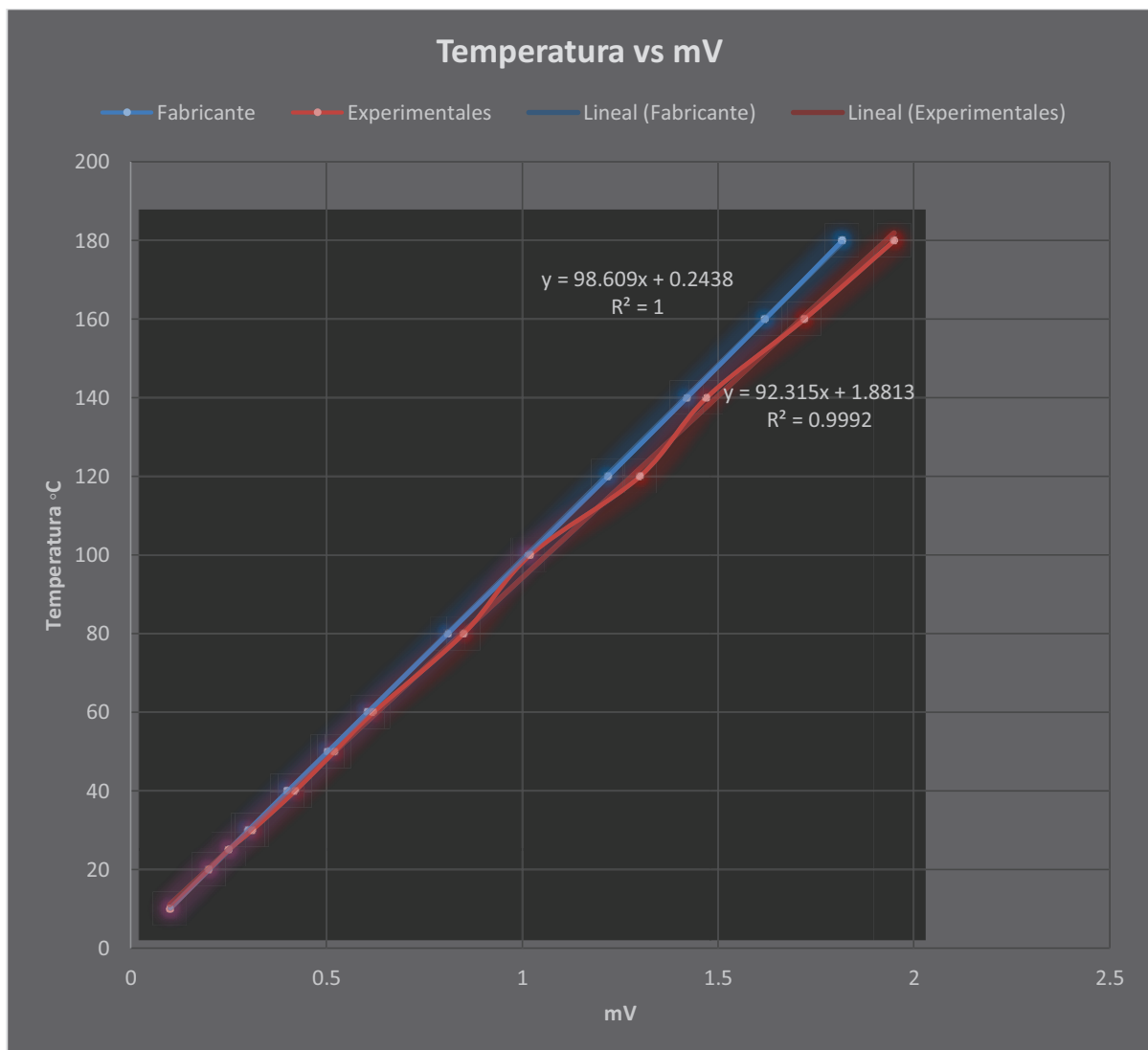


Figura 5. 1 Regresión lineal de los datos obtenidos

### 5.1.1.1 Análisis de los datos obtenidos

Un muestreo de los datos de temperatura para cada termocupla, tabla 5.2, antes del acondicionamiento muestra un margen de error muy grande, esto se visualiza en la figura 5.2.

Tabla 5. 2 Muestreo de las termocuplas

TERMOCUPLA 1		TERMOCUPLA 2		TERMOCUPLA 3		TERMOCUPLA 4	
EVENTO	T [°C]	EVENTO	T [°C]	EVENTO	T [°C]	EVENTO	T [°C]
1	25	1	24	1	25	1	25
2	26	2	25	2	26	2	24
3	22	3	26	3	24	3	26
4	25	4	22	4	22	4	26
5	24	5	24	5	24	5	27
6	23	6	25	6	24	6	25
7	24	7	24	7	25	7	24
8	22	8	25	8	25	8	26
9	21	9	24	9	26	9	24
10	25	10	25	10	26	10	23
$\sum X1$	237	$\sum X2$	244	$\sum X3$	247	$\sum X4$	250
T. Rfr	22	T. Rfr	22	T. Rfr	22	T. Rfr	22
$\bar{X1}$	23,7	$\bar{X2}$	24,4	$\bar{X3}$	24,7	$\bar{X4}$	25
%Error	7,727	%Error	10,909	%Error	12,272	%Error	12

$$\bar{x} = \frac{\sum X}{\# Ev} [^{\circ}C] \quad \text{Ec. (5. 1)}$$

Donde:

$\sum X$  = Sumatoria de las muestras

$\#Ev$  = Número de eventos cada 15 min

$\bar{x}$  = Valor promedio, [°C]

$$\% Error = \frac{|T. Rfr - \bar{X}|}{T. Rfr} * 100 \quad \text{Ec. (5. 2)}$$

Donde:

$\% Error$  = Porcentaje de error

$T. Rfr$  = Temperatura de referencia, [°C]

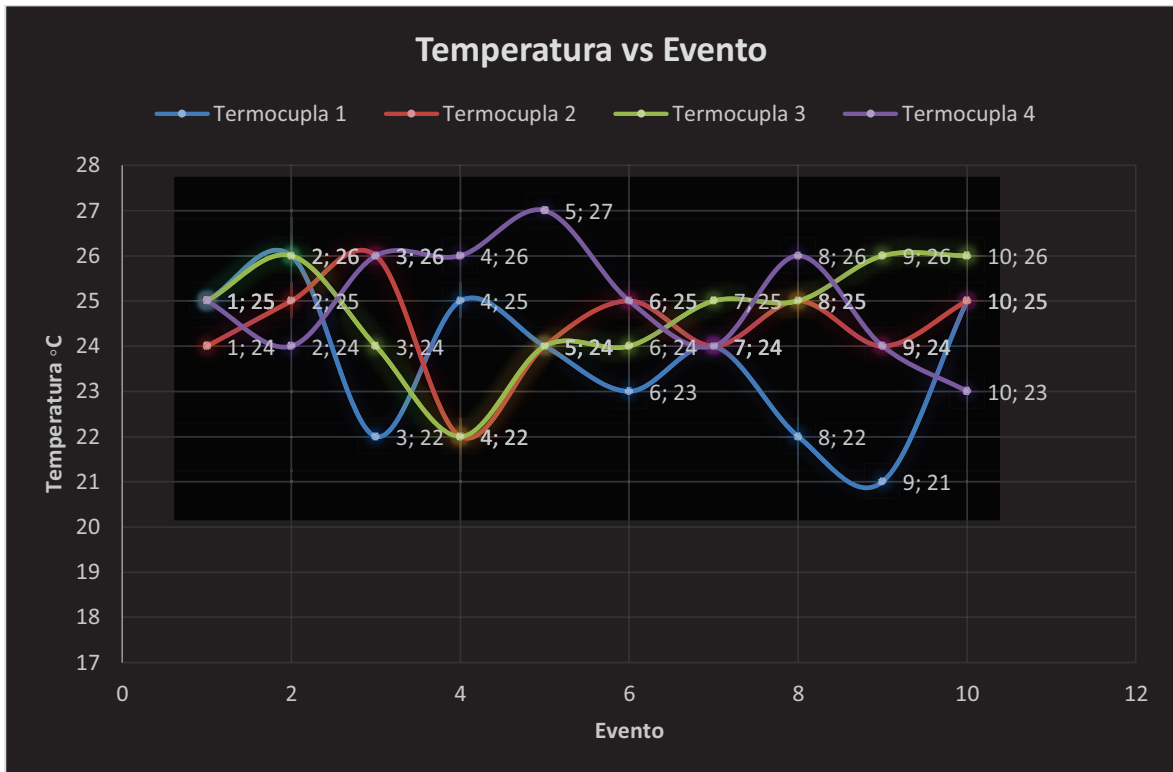


Figura 5. 2 Variación de la temperatura sin acondicionar

Implementando un filtro de datos en el programa de adquisición y acondicionado la señal con la ecuación de la regresión lineal,  $92.315X + 1.8813$ , se tiene:

Tabla 5. 3 Muestreo de temperatura con termocuplas acondicionadas

TERMOCUPLA 1		TERMOCUPLA 2		TERMOCUPLA 3		TERMOCUPLA 4	
EVENTO	T[°C]	EVENTO	T [°C]	EVENTO	T[°C]	EVENTO	T [°C]
1	21	1	23	1	24	1	22
2	22	2	23	2	24	2	21
3	22	3	22	3	22	3	22
4	22	4	23	4	23	4	21
5	23	5	25	5	24	5	21
6	23	6	24	6	24	6	22
7	23	7	22	7	24	7	25
8	24	8	24	8	24	8	24
9	23	9	24	9	22	9	25
10	22	10	24	10	24	10	24
$\sum X1$	225	$\sum X2$	234	$\sum X3$	235	$\sum X4$	227
T. Rfr	22	T. Rfr	22	T. Rfr	22	T. Rfr	22
$\bar{X1}$	22,5	$\bar{X2}$	23,4	$\bar{X3}$	23,5	$\bar{X4}$	22,7
%Error	2,272	%Error	6,363	%Error	6,818	%Error	3,083

En la tabla 5.3 se observa un margen de error inferior al mostrado en la tabla 5.4. Los valores tienden a equilibrarse en los valores promedios. Las pequeñas variaciones mostradas en la figura 5.3 se deben a la variación de las condiciones ambientales.

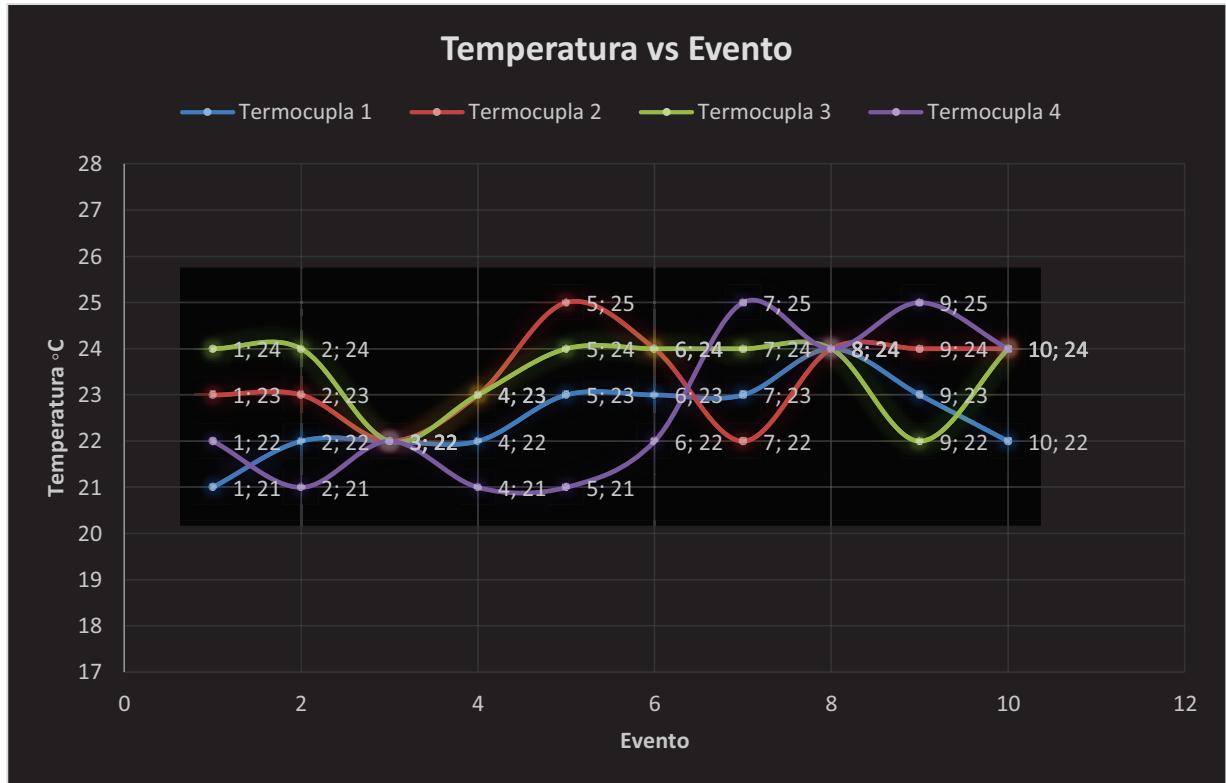


Figura 5. 3 Variación de temperatura acondicionada

## 5.1.2 PRUEBAS PARA LA ALETA DE ACERO TIPO TRIANGULAR

### 5.1.2.1 Procedimiento experimental

- Tomar la aleta y empaparla de aceite entre la parte de la placa fuente de calor y la base de la aleta
- Asegurar la aleta a la placa fuente de calor
- Colocar las termocuplas en los orificios de medición
- Encender el ordenador que está destinado para el equipo
- Ejecutar el programa de adquisición y de control
- Conectar el puerto USB del DAQ 6009 al ordenador
- Seleccionar la temperatura de control para el trabajo del cartucho calefactor

- Verificar que los comandos de encendido y apagado funcionen dentro del programa de LabView
- Encender la fuente de alimentación total del equipo
- Esperar a que las temperaturas se estabilicen
- Registra datos de temperatura
- Examinar y graficar los datos
- Apagar los comandos de temperatura y control
- Sacar la aleta con guantes que soporten altas temperaturas
- Colocar la siguiente aleta y esperara alrededor de tres minutos y encender de nuevo los controles del programa

En el anexo M se encuentra la guía de prácticas de laboratorio.

#### 5.1.2.2 Mediciones obtenidas para la aleta de acero tipo triangular

Tiempo: 35 minutos

En la tabla 5.4 se muestra los datos obtenidos para la aleta triangular de acero.

Tabla 5. 4 Datos para la aleta triangular de acero

SIMULADOS COMSOL 4.0		TEÓRICOS		EXPERIMENTALES	
L [m]	T [K]	LK	T [K]	L [m]	T [K]
0	373	0	373	0	373
0.1	342.82	0.1	348.72	0,1	352
0.2	323.15	0.2	329.72	0,2	331
0.3	311	0.2	315	0,3	314

Tabla 5. 5 Porcentaje de error, aleta triangular de acero

SIMULADOS	EXPERIMENTALES	% ERROR
T [K]	T [K]	
373	373	0
342.82	352	2.6764677
323.15	331	2,42767256
311	314	0.96463023
TEÓRICOS	EXPERIMENTALES	% ERROR
T [K]	T [K]	
373	373	0
348,72	352	0,9405827
329,72	331	0,38820818
315	314	0,31746032

### 5.1.2.2.1 Curvas de distribución y eficiencia de la aleta de acero tipo Triangular

Se presenta las curvas de distribución de temperatura, figura 5.4, simulada, teórica y experimental.

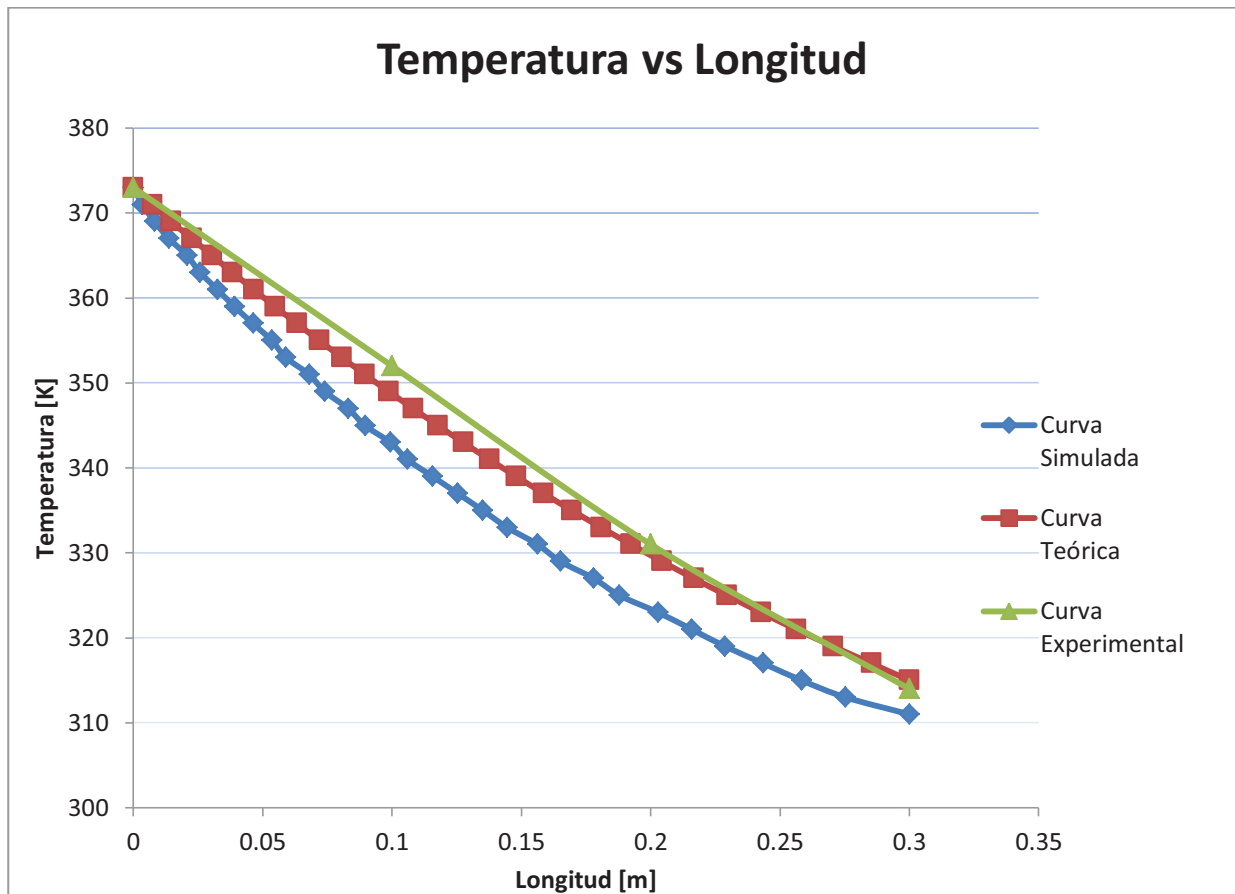


Figura 5. 4 Curva de distribución, aleta triangular de acero

### 5.1.2.2.2 Análisis de resultados

La curva experimental tiende a seguir la curva teórica, los porcentajes de error entre ellas tiene un mínimo del 0% con un máximo de 0.94%, tabla 5.5. Sin embargo los datos simulados en COMSOL 4.0 muestran errores que oscilan entre el 0% hasta 2.67% valores que son mayores en comparación con los datos teóricos.

El programa COMSOL 4.0 considera que la distribución de temperatura es bidimensional en toda la longitud de la aleta es por esta razón que el método de elementos finitos varía con un rango de error más alto en comparación con los datos teóricos y experimentales.



Se observa también que la suposición número 5 de Murray y Gardner mostrada en el capítulo 2 es muy acertada para este tipo de aletas, esta suposición hace que el cálculo de la curva de distribución de temperatura sea menos complejo.

Utilizando la ecuación 2.25 se tiene una eficiencia de:

$$n_f = 59.29\%$$

Valor que corrobora el por qué la curva de distribución decrece mucho con respecto a la temperatura base.

### 5.1.2.3 Mediciones obtenidas para la aleta de acero de sección circular constante

Tiempo: 31 minutos

En la tabla 5.6 se muestra los datos obtenidos para la aleta triangular de acero.

Tabla 5. 6 Datos para la aleta de sección circular constante de acero

SIMULADOS COMSOL 4.0		TEÓRICOS		EXPERIMENTALES	
L[m]	T [K]	L[m]	T [K]	L [m]	T [K]
0	373	0	373	0	373
0.1	336.23	0.1	338.62	0,1	340
0.2	320.14	0.2	322.29	0,2	324
0.3	315	0.2	315	0,3	313

Tabla 5. 7 Porcentajes de error, aleta circular de acero

SIMULADOS	EXPERIMENTALES	% ERROR
T [K]	T [K]	
373	373	0
336,23	340	1,12125628
320,14	324	1,2057225
315	313	0,63492063
TEÓRICOS	EXPERIMENTALES	% ERROR
T [K]	T [K]	
373	373	0
338,62	340	0,40753647
322,29	324	0,53057805
315	313	0,63492063

### 5.1.2.3.1 *Curvas de distribución y eficiencia de la aleta de acero de sección circular constate*

Se presenta las curvas de distribución de temperatura, figura 5.5, simulada, teórica y experimental.

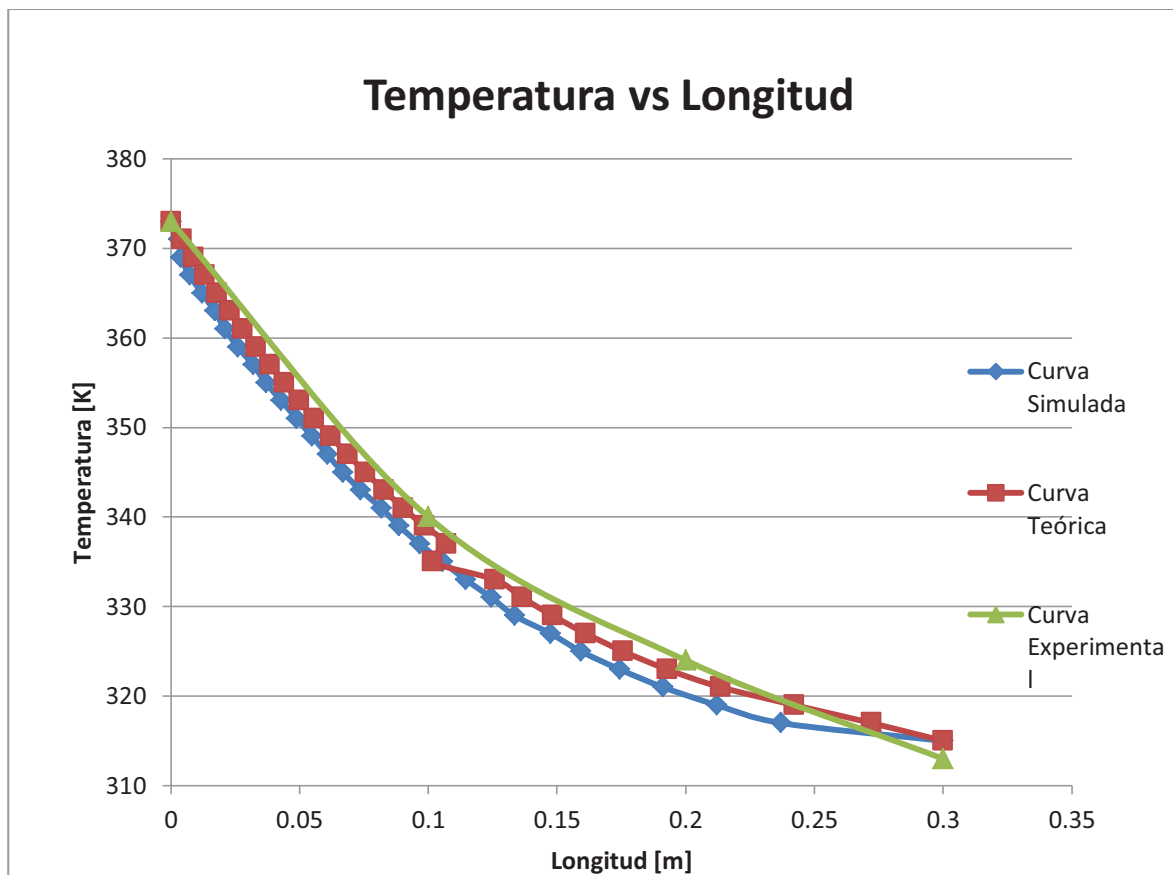


Figura 5. 5 Curva de distribución, aleta circular de acero

### 5.1.2.3.2 *Análisis de resultados*

Los cambios de temperatura más notorios de las tres curvas de distribución oscilan entre el rango de 0 a 0.2 metros de la longitud de la aleta.

Los porcentajes de errores, tabla 5.7, son pequeños tanto para los datos simulados como para los teóricos por lo que se considera que la adquisición de datos es estable en uso continuo del equipo.

La curva teórica presenta valores más próximos a los experimentales seguido de la curva simulada, sin embargo la línea de tendencia de ambas curvas es aceptable para respaldar lo obtenido.

Los valores que van desde 0.2 a 0.3 metros de longitud de la aleta son menos precisos debido a que presenta variaciones pequeñas de temperatura en una longitud significativa.

La eficiencia para este tipo de aletas aplicando la ecuación 2.25 es de:

$$n_f = 50.63\%$$

Este valor es inferior a la eficiencia de la aleta tipo triangular esto se debe a que la disposición geométrica de la misma es más estable para distribuir energía. Esta prueba indica que variando el tipo de geometría de las aletas se puede tener equipos más eficientes, sin embargo el proceso constructivo de aletas más eficientes es más costoso.

#### 5.1.2.4 Mediciones obtenidas para la aleta de aluminio de sección circular constante

Tiempo: 21 minutos

En la tabla 5.8 se muestra los datos obtenidos para la aleta triangular de acero.

Tabla 5. 8 Datos para la aleta circular de sección constante de aluminio

SIMULADOS COMSOL 4.0		TEÓRICOS		EXPERIMENTALES	
L[m]	T [K]	L[m]	T [K]	L [m]	T [K]
0	373	0	373	0	373
0.1	360,29	0.1	361	0,1	362
0.2	353,33	0.2	354,17	0,2	356
0.3	351	0.2	351	0,3	349

Tabla 5. 9 Porcentaje de error, aleta circular de aluminio

SIMULADOS	EXPERIMENTALES	% ERROR
T [K]	T [K]	
373	373	0
360,29	362	0,474618
353,33	356	0,755668
351	349	0,569801
TEÓRICOS	EXPERIMENTALES	% ERROR
T [K]	T [K]	
373	373	0
361	362	0,277008
354,17	356	0,516701
351	349	0,569801

#### 5.1.2.4.1 *Curvas de distribución y eficiencia de la aleta de aluminio de sección circular constante*

Se presenta las curvas de distribución de temperatura, simulada, teórica y experimental.

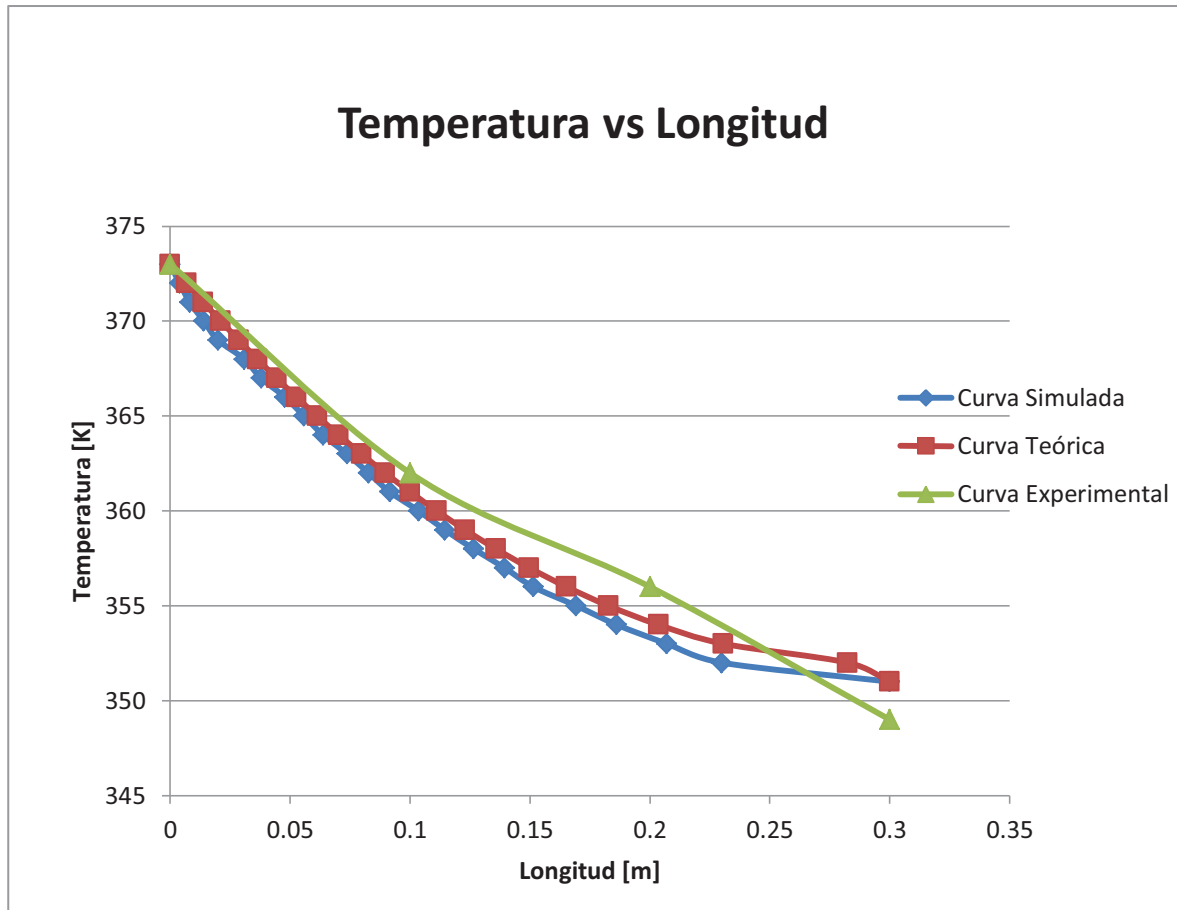


Figura 5. 6 Curva de distribución, aleta circular de aluminio

#### 5.1.2.4.2 *Análisis de resultados*

Al inicio de las curvas, figura 5.6, los valores difieren en un rango pequeño, sin embargo al sobre pasar la longitud de 0.15 metros medidos desde la base los valores experimentales presenta un cambio brusco de temperatura.

La línea decreciente de las curvas simuladas y teóricas es la misma, el porcentaje de error más amplio encontrado para este tipo de aleta es de 0.75%, tabla 5.9.

Utilizando la ecuación 2.25 da como resultado una eficiencia de:

$$n_f = 81.78\%$$

Valor que supera significativamente a las aletas de sección circular de acero y a la aleta triangular de acero. La diferencia de temperatura entre la base y el extremo es de 24 °C valor que es el más pequeño de entre todas las aletas examinadas

con esto se concluye que la aleta tipo circular de aluminio es la más eficiente seguida de la aleta tipo triangular, figura 5.7.

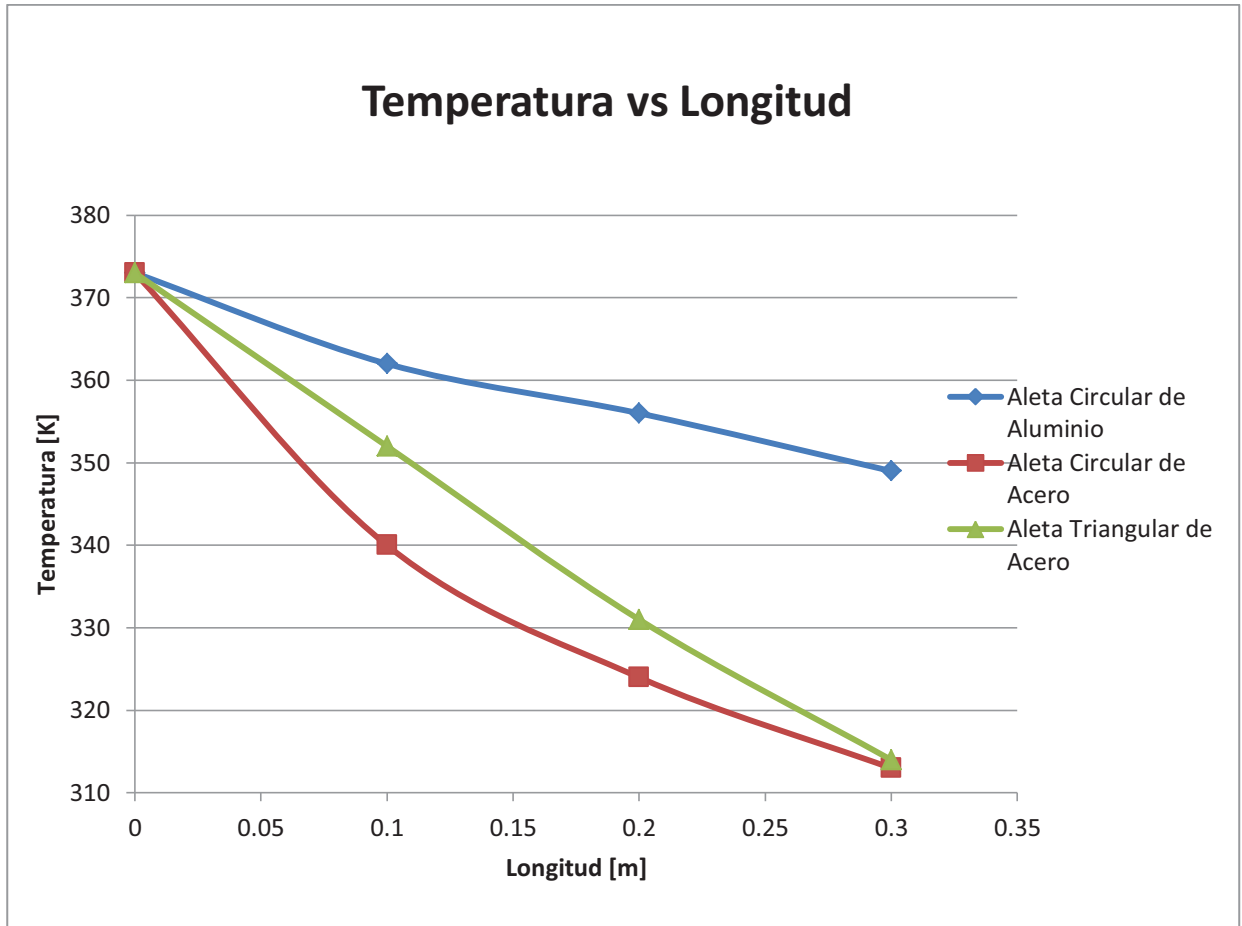


Figura 5. 7 Curvas experimentales de las aletas

## CAPÍTULO VI.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se enlistan las conclusiones y recomendaciones principales referentes al diseño y construcción del equipo de superficies extendidas en estado estable.

#### 6.1 CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un equipo para el estudio de la transferencia de calor, en Superficies Extendidas en Estado Estable, destinado al laboratorio de Transferencia de Calor. Este equipo permitirá adquirir datos de temperatura de forma digital, para generar curvas de distribución de temperatura.
- El equipo construido hace posible que los estudiantes de Ingeniería Mecánica visualicen mejor el fenómeno termofísico de la transferencia de calor en superficies extendidas.
- El uso de un adquisidor de datos (DAQ) y demás dispositivos electrónicos proporciona entre otros los siguientes beneficios:
  - a) Es sustituible a cambios de programación mediante el software LabView.
  - b) Minimiza la posibilidad del error humano al momento de adquirir y procesar datos.
  - c) La adquisición de datos analógicos y respuesta de señales digitales de control es inmediata, contribuyendo así a que los cartuchos calefactores no sufran sobreesfuerzo térmico aumentando además la vida útil de dichos dispositivos.
- En las termocuplas tipo bulbo, la sección metálica absorbe energía calorífica y actúa como un sumidero de energía a temperaturas cercanas a 100°C. Este incremento de energía ocasiona que las termocuplas no tomen lecturas en tiempo real.

- Los cartuchos calefactores utilizados no solo se limitan a proporcionar la temperatura de operación de 100°C; varios ensayos hechos durante el protocolo de prueba demuestran que los cartuchos calefactores son capaces de operar a temperaturas cercanas a 300°C.
- La utilización de fibra cerámica, Nutec Fibatec, como material aislante proporciona tiempos de calentamiento cortos y aumenta el tiempo de enfriamiento de la placa fuente de calor. Estas propiedades ayudan a que el consumo de energía calorífica del equipo disminuya y aumente la vida útil de los cartuchos calefactores.
- La consideración de conducción unidimensional de transferencia de calor para las superficies extendidas proporciona datos de temperatura cercanos a los reales. En general, se puede decir que con los modelos matemáticos considerados para este tipo de superficies extendidas se obtienen datos semejantes a los datos experimentales; así lo demuestran los rangos de errores obtenidos que oscilan entre el 0% y 0,94%.
- La simulación en COMSOL 4.0 para el estudio de la transferencia de calor en superficies extendidas predijo con gran exactitud el comportamiento de las aletas bajo una fuente externa de calor. Tal es el caso que se llegó a obtener porcentajes de error que oscilan entre el 0% al 2,67% comparados con los datos experimentales.
- La suposición de introducir un coeficiente global de convección constante tanto en el software de simulación como en las ecuaciones respectivas fue acertada, esto se respalda con el hecho de que los datos experimentales obtenidos fueron muy semejantes a los simulados y teóricos.
- Este proyecto cuenta con un registro de datos experimentales obtenidos que resulta de ensayar varias veces las superficies extendidas. El tiempo promedio que se tiene al registrar todos los datos es de una hora con 27 minutos, (1:27), período adecuado para la realización de la práctica de laboratorio.
- El equipo construido es apto para el análisis de diferentes superficies extendidas. Como trabajo a futuro se puede implementar nuevas superficies extendidas de diferentes formas y materiales.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Antes de proceder hacer las prácticas es recomendable poner en ejecución el programa de adquisición y de control. Se debe verificar que los comandos de control corran con normalidad dentro del programa de LabView sin necesidad de conectar todo el sistema de alimentación del equipo.
- Una vez finalizado el periodo de prueba para una aleta se recomienda colocar la siguiente y esperar alrededor de tres minutos hasta que el calor que se encontraba acumulado en la placa fuente de calor se disipe hacia la nueva aleta. En ese momento se debe encender los comandos de control del programa, así se evita el sobre esfuerzo térmico de los cartuchos calefactores.
- Se recomienda enfriar las termocuplas a temperatura ambiente cada dos horas de uso continuo del equipo. Así se evita que las termocuplas tomen lecturas erróneas de temperatura.
- Para la adquisición de datos de temperaturas se recomienda utilizar amplificadores operacionales. Los resultados obtenidos con el AD 595 muestra señales analógicas más estables y concisas para la elaboración de las curvas de distribución de temperaturas.
- Cuando se realice el mantenimiento del equipo, es recomendable que los módulos electrónicos de adquisición y control se manipule con guantes de látex, para evitar que la energía electrostática del cuerpo dañe los elementos internos de los módulos.
- El uso de modelos basados en elementos finitos demuestra ser una herramienta muy útil en el diseño de superficies extendidas. Consecuentemente, para su uso se recomienda introducir al software los valores de constantes, (coeficiente de convección, conductividad térmica, temperatura base), más cercanos a la realidad para así obtener mejores resultados.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Bejan, A., & Kraus, A. (201). *Heat transfer handbook*. Canada: John Wiley & Sons.
- [2]. Çengel, Y. (2004). *Transferencia de Calor y Masa*. México: MC Graw Hill.
- [3]. Coffey, J. (2010). *Universe Today*. Obtenido de <http://www.universetoday.com/82331/what-is-conduction/>
- [4]. Dewan, L., & Massie, M. (2013). *PoderenlaRed.com*. Obtenido de <http://www.poderenlared.com/2013/03/17/disenan-reactor-nuclear-para-proveer-de-energia-a-todo-el-mundo-por-70-anos/>
- [5]. Firerod Cartridge Header. (2013). *Watlow Better Solutions*. Obtenido de <http://pdf.directindustry.com/pdf/watlow/firerod-cartridge-heaters/7347-383289.html>
- [6]. Focus, T. (2013). *Guangzhou Gele Heat Energy Equipment Manufacturing*. Obtenido de [http://es.made-in-china.com/co\\_gzgele/product\\_Industrial-Heat-Exchangers-for-Rubber-Glove-Drying-\\_esnohyysg.html](http://es.made-in-china.com/co_gzgele/product_Industrial-Heat-Exchangers-for-Rubber-Glove-Drying-_esnohyysg.html)
- [7]. Gear, S. (2013). *Slash Gear*. Obtenido de <http://www.slashgear.com/tags/accessories-reviews/page/19/>
- [8]. Holman, J. (1999). *Transferencia de Calor*. México: McGRAW Hill .
- [9]. Incropera, F., & De Witt, D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: PRENTICE HALL.
- [10]. Instruments, N. (2013). *National Instrumen y Accesorios* . Obtenido de <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201987>
- [11]. Kern, D. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor*. México: McGRAW Hill.
- [12]. Kraus, A., Aziz, A., & Welty, J. (2001). *Extended Surface Heat Transfer*. Canada: John Wiley & Sons.
- [13]. Kreith, F., & Bohn, M. (2001). *Principios de Transferencia de Calor*. México: Thomson Editores.
- [14]. Maxi watt. (2010). *Maxi watt Precisión en calor*. Obtenido de <http://www.resistencias.com/downloads/catalogo.pdf>

- [15]. Maz cr.com. (20193). *Maz cr.com*. Obtenido de [http://www.mazcr.com/store/index.php?route=product/product&product\\_id=1054](http://www.mazcr.com/store/index.php?route=product/product&product_id=1054)
- [16]. MB Group. (2013). *Lambretta Spares*. Obtenido de <http://www.lambrettaspares.com/>
- [17]. Megatech. (2013). *Nautic expo*. Obtenido de <http://pdf.nauticexpo.com/pdf/megatech-power/commercial-continuous-duty-mtd-mtd-380e/26397-23466.html#search-intercambiadores%20calor>
- [18]. Melendez, R. (2010). *Gamerz*. Obtenido de <http://gamerzsena.blogspot.com/>
- [19]. Mills, A. (1997). *Transferencia de Calor*. Colombia: McGRAW Hill.
- [20]. Sulzer. (2013). *Sulzer Products y Services*. Obtenido de <http://www.sulzer.com/>
- [21]. Testo , A. (2010). *Academia online*. Obtenido de <http://www.academiatesto.com.ar/cms/?q=tablas-de-emisividad>
- [22]. Varela, C. (2010). *Profesor en linea*. Obtenido de [http://www.profesorenlinea.cl/fisica/Calor\\_y\\_Temperatura.htm](http://www.profesorenlinea.cl/fisica/Calor_y_Temperatura.htm)
- [23]. Watlow Heaters. (2013). *Watlow Better Thermal Solution*. Obtenido de <http://pdf.directindustry.com/pdf/watlow/heaters-from-watlow/7347-413393.html>

**ANEXOS**

## ANEXO A: ECUACIÓN DE BESSEL GENERALIZADA

Las siguientes ecuaciones sirven para la obtención de la distribución de temperaturas de las aletas de sección transversal variable.

$$\frac{d}{dx} \left( x^p \frac{dy}{dx} \right) + (ax^j + bx^k)y = 0 \quad (\text{A.1. 1})$$

$$x^{\frac{\beta}{\alpha}} \left[ c1 * I_n \left( wx^{\frac{1}{\alpha}} \right) + c2 * k_n \left( wx^{\frac{1}{\alpha}} \right) \right] \quad (\text{A.1. 2})$$

Donde:

$$\alpha = \frac{2}{2 - p + j} \quad (\text{A.1. 3})$$

$$\beta = \frac{1 - p}{2 - p - j} \quad (\text{A.1. 4})$$

$$w = -\alpha\sqrt{a} \quad (\text{A.1. 5})$$

$$n = \frac{\sqrt{(1 - p^2) - 4b}}{2 - p + j} \quad (\text{A.1. 6})$$

### Ecuación de la distribución de temperatura en aleta longitudinal tipo triangular

La ecuación del perfil de una aleta de sección transversal tipo triangular se define como:

$$y = \frac{\delta_b}{2b} x \rightarrow f(x) \quad (\text{A.1. 7})$$

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{\delta_b}{2b} \quad (\text{A.1. 8})$$

Reemplazando  $f(x)$  en la ecuación (2.16); y con el reemplazo  $m = \sqrt{\frac{2h}{k\delta_b}}$  da como

resultado la siguiente ecuación de Bessel:

$$x \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{d\theta}{dx} - m^2 b \theta = 0 \quad (\text{A.1. 9})$$

De la ecuación (A.1. 9) tenemos que

$$p = 0$$

$$\begin{aligned}
 b &= 0 \\
 j &= 0 \\
 \sqrt{a} &= m\sqrt{b}
 \end{aligned}$$

Remplazando en las ecuaciones  $\alpha, \beta, w, n$  se tiene los siguientes valores que remplazando en la ecuación general obtenemos la solución

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \frac{2}{2 - 1 + 0} = 2 \\
 \beta &= \frac{1 - 1}{2 - 1 - 0} = 0 \\
 w &= -2m\sqrt{b} \\
 n &= \frac{\sqrt{(1 - 1^2) - 4 * 0}}{2 - 1 + 0} = 0
 \end{aligned}$$

$$[c1 * I_0(2m\sqrt{bx}) + c2 * k_0(2m\sqrt{bx})] = \theta(x) \quad \text{(A.1. 10)}$$

La temperatura en el extremo debe ser necesariamente finita y la temperatura en la base debe ser máxima.

Con una temperatura determinada en el extremo de la aleta se sabe que para  $x = 0$  el factor  $k_0(0)$  es infinito, la única solución que existe para que la ecuación tenga solución es que la constante  $c2$  sea cero.

$$c1 * I_0(2m\sqrt{bx}) = \theta(x) \quad \text{(A.1. 11)}$$

Si  $\theta(x = b) = \theta_b$  se tiene la condición de frontera en la base de la aleta y la constante  $c2$  será igual a:

$$\begin{aligned}
 \theta_b &= c1 * I_0(2m\sqrt{b^2}) \\
 c1 &= \frac{\theta_b}{I_0 2mb}
 \end{aligned}$$

Remplazando en la ecuación (A.1. 11) se tiene:

$$\theta(x) = \frac{\theta_b I_0 (2m\sqrt{bx})}{I_0 2mb} \quad (\text{A.1. 12})$$

De manera similar se puede obtener cualquier ecuación para aletas de sección transversal variable.

## ANEXO B: PROPIEDADES DE CERAMIC FIBER BOARDS AND SHAPES

### CERAMIC FIBER BOARDS AND SHAPES

**Board:** Nuteo Fibrated® ceramic fiber board is a lightweight refractory material processed with alumina silica fibers for applications at temperatures up to 1850°C ( 3300°F ).

Nuteo Fibrated® board is a vacuum formed product that resists higher gas velocities than ceramic fiber blanket. It is ideal for furnace, boiler duct and stack lining due to its low thermal conductivity and low heat storage allowing shorter cycle times and quicker access for maintenance.

**Shapes:** Nuteo Fibrated® ceramic fiber special shapes are available in a wide variety of shape configurations

#### Technical Specifications

	LD	MD	HD	LD	LD
	2300	2300	2300	2600	2800
<b>Maximum use limit</b>					
°C	1260	1260	1260	1426	1538
°F	2300	2300	2300	2600	2800
<b>Continuous use limit</b>					
°C	1149	1149	1149	1316	1426
°F	2100	2100	2100	2400	2600
<b>Melting Point</b>					
°C	1732	1732	1732	1780	1850
°F	3150	3150	3150	3236	3362
<b>Density Kg/m<sup>3</sup></b>	288	368	448	288	288
<b>(lbs./ft<sup>3</sup>)</b>	18	23	28	18	18
<b>Thermal Shrinkage (%)</b>	2-3	1-2	1-2	1-2	1-2
24 hours @2200 °F					
<b>Chemical Analysis (%)</b>	39-41	45-47	43-45	48-50	63-65
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	52-54	44-46	47-49	45-47	32-34
SiO <sub>2</sub>	2-3	2-3	2-3	1-2	1-2
Others					
<b>Thermal Conductivity W/mK (Btu in/hr ft<sup>2</sup> °F)</b>					
	LD	MD	HD	LD	LD
316°C (600 °F)	0.07(0.5)	0.08(0.6)	0.13(0.9)	0.07(0.5)	0.07(0.5)
538°C (1000 °F)	0.08(0.6)	0.10(0.7)	0.14(1.0)	0.08(0.6)	0.08(0.6)
760°C (1400 °F)	0.12(0.8)	0.13(0.9)	0.17(1.2)	0.12(0.8)	0.12(0.8)
1094°C (2000 °F)	0.17(1.2)	0.17(1.2)	0.20(1.4)	0.17(1.2)	0.17(1.2)

#### Board Dimensions

Standard	European
1/2" x 24" x 36"	Thickness: 10, 25, 38, 50mm
1" x 24" x 36"	Width: 610 & 1000mm
1-1/2" x 24" x 36"	Length: 1000 & 1220mm
2" x 24" x 36"	

Also available in 1220 mm (48") long



# boards

Nutec Fibrotec™ Boards are processed from alumina and silica blends for applications with temperatures up to 1650°C (3000°F).

Nutec Fibrotec™ Boards are vacuum formed products that are made to resist high velocities. These products provide low thermal conductivity, low heat loss, and heat storage. Vacuum Formed Boards are ideal for furnace linings, boiler ducts and stacks.

## FEATURES

- Low Thermal Conductivity
- Low Heat Loss and Storage
- Lightweight
- Resistance to High Velocity
- Easy to Install
- Resistant to Non-Ferrous Metals
- Contains No Asbestos

## TYPICAL APPLICATIONS

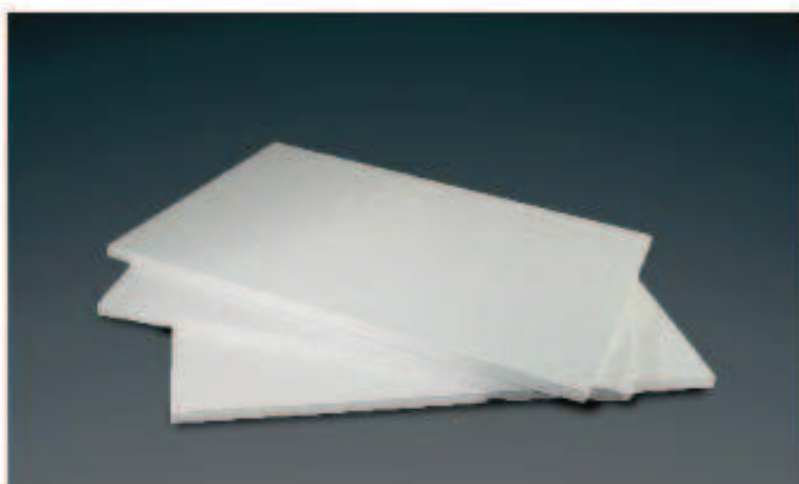
- Refractory Lining for Industrial Furnaces
- Combustion Chamber Liners, Boilers and Heaters
- Expansion Joints
- Board over Blanket Linings
- Back-Up Insulation



All Board Dimensions	Standard	European			
Thickness:	3/4", 1", 1 1/2", 2"	2 1/8", 3"	10, 12.5, 25, 38, and 50 mm.		
Width:	12", 24"		610 and 1000 mm.		
Length:	36", 48"		1000 and 1200 mm.		
Technical Specifications	LD-3300	LD-2400	LD-2800	LD-3000	
Maximum Use Temperature, °C (°F)	1260 (2300)	1425 (2600)	1538 (2800)	1650 (3000)	
Continuous Use Limit, °C (°F)	1148 (2100)	1316 (2400)	1425 (2600)	1540 (2800)	
Melting Point, °C (°F)	1732 (3150)	1780 (3236)	1850 (3362)	1815 (3300)	
Density kg / m <sup>3</sup> (lb./ft. <sup>3</sup> )	256-320 (16-20)	256-320 (16-20)	256-320 (16-20)	256-320 (16-20)	
Thermal Shrinkage (%)					
24 Hrs. @ 1200°C (2192°F)	1-1	2-3	1-2	@1540°C (2800°F) < 4	
Chemical Analysis (%)					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38-41	48-50	63-65	63-65	
SiO <sub>2</sub>	52-54	45-47	32-34	35-37	
Others	2-3	1-2	1-2	--	
LOI (typical) / Inorganic	4-6/ 0	4-6/ 0	5-6/ 0	4-6/ 0	



## boards



Technical Specifications	HD-2300	HD-2600	HD-3000
Maximum Use Temperature, °C (°F)	1260 (2300)	1425 (2600)	1650 (3000)
Continuous Use Limit, °C (°F)	1149 (2100)	1316 (2400)	1540 (2800)
Melting Point, °C (°F)	1732 (3150)	1780 (3236)	1815 (3300)
Density kg / m <sup>3</sup> (lb./ft <sup>3</sup> )	416 - 480 (26 - 30)	416 - 480 (26 - 30)	416 - 480 (26 - 30)
<b>Thermal Shrinkage (%)</b> 24 Hrs. @ 1200°C (2192°F)			
	1 - 2	1 - 2	@1540°C (2800°F) < 4
<b>Chemical Analysis (%)</b>			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43-45	52-54	71-73
SiO <sub>2</sub>	47-49	41-43	27-29
Others	2-3	5-7	--
L.O.I. Organic / Inorganic	4-5/0	4-5/0	4-6/0

## ANEXO C: PROPIEDADES DEL AIRE A DIFERENTES TEMPERATURAS (Incropera & De Witt, 1999, pág. 839)

Apéndice A ■ Propiedades termofísicas de la materia

839

TABLA A.4 Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica<sup>a</sup>

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
<b>Aire</b>							
100	3.5562	1.032	71.1	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
<b>Amoniaco (NH<sub>3</sub>)</b>							
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



# ANEXO D: PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL ALUMINIO Y ACERO A DIFERENTES TEMPERATURAS

Tabla A.1 Propiedades termofísicas de sólidos metálicos seleccionados<sup>a</sup>

Composición	Punto de fusión (K)	Propiedades a 300 K					Propiedades a varias temperaturas (K)						
		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg · K)	$k$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k$ (W/m · K)/ $c_p$ (J/kg · K)							
						400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Acero puro	1810	7870	447	80.2	23.1	134	94.0	69.5	54.7	43.3	32.8	28.3	32.1
Aceros al carbón													
Carbon ordinario (Mn $\leq$ 1%, Si $\leq$ 0.1%)		7854	434	60.5	17.7	216	384	490	574	680	975	609	654
AISI 1010		7832	434	63.9	18.8			58.7	48.8	39.2	31.3		
Carbon-silicio (Mn $\leq$ 1%, 0.1% < Si $\leq$ 0.6%)		7817	446	51.9	14.9			48.7	55.9	68.5	116.9		
Carbon-manganeso-silicio (1% < Mn $\leq$ 1.65%, 0.1% < Si $\leq$ 0.6%)		8131	434	41.0	11.6			42.2	39.7	35.0	27.6		
Aceros con cromo (bajo)													
1Cr-1Mo-Si (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)		7822	444	37.7	10.9			38.2	36.7	33.3	26.9		
1Cr-1Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)		7858	442	42.3	12.2			42.0	39.1	34.5	27.4		
1Cr-V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)		7836	443	48.9	14.1			46.8	42.1	36.3	28.2		
Aceros inoxidables													
AISI 302		8055	480	15.1	3.91			17.3	20.0	22.8	25.4		
AISI 304	1670	7900	477	14.9	3.95			51.2	55.9	58.5	60.6		
AISI 316		8238	468	13.4	3.48			16.6	19.8	22.6	25.4	28.0	31.7
AISI 347		7978	480	14.2	3.71			51.5	55.7	58.2	61.1	64.0	68.2

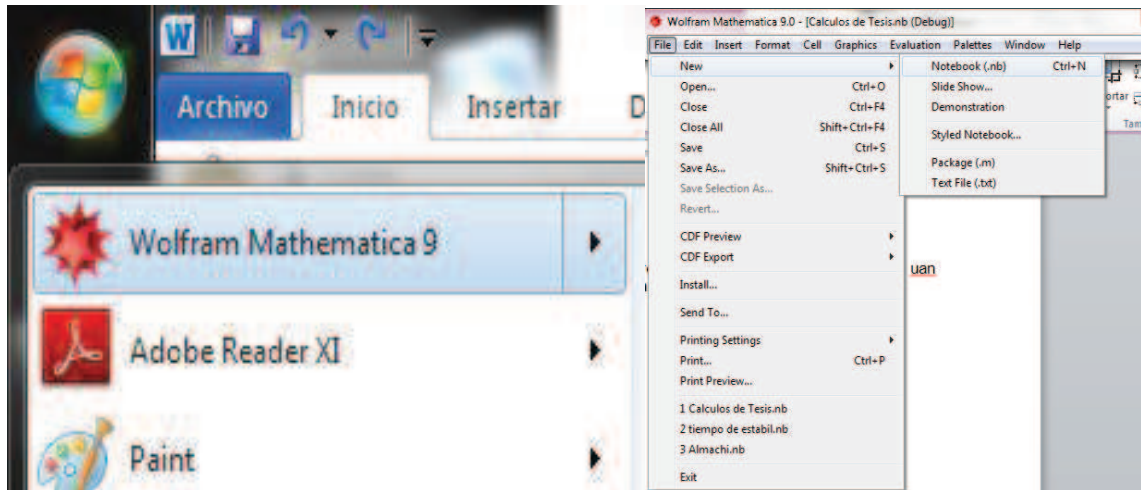


DEPARTAMENTO DE BIBLIOTECA  
Universidad Simón Bolívar - Sede

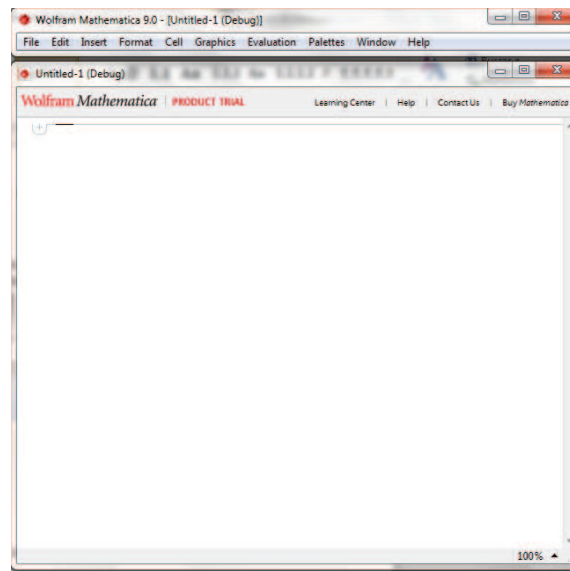


## ANEXO E: PROGRAMACIÓN EN WOLFRAM MATHEMATICA

Se ejecuta el icono del programa y se procede a crear u nuevo NOTEBOOK, una vez creado se procede a guardar el archivo.



Aparecerá la siguiente pantalla, la cual indica que esta lista para programar.



## DECLARACIÓN DE VARIABLES

```

h=8.938;
φ=0.02;
p=π*φ;
A□=π*(φ/2)2;
δb=0.02;
Propiedades de las aletas;
k1=237.99;
k2=46.737;
k3=46.737;
m1=√(h*p/k1);
m2=√(h*p/k2);
m3=√(2*h/k3/b);
L1=0.3;
T∞=20;

```

## CALCULO DE DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS.

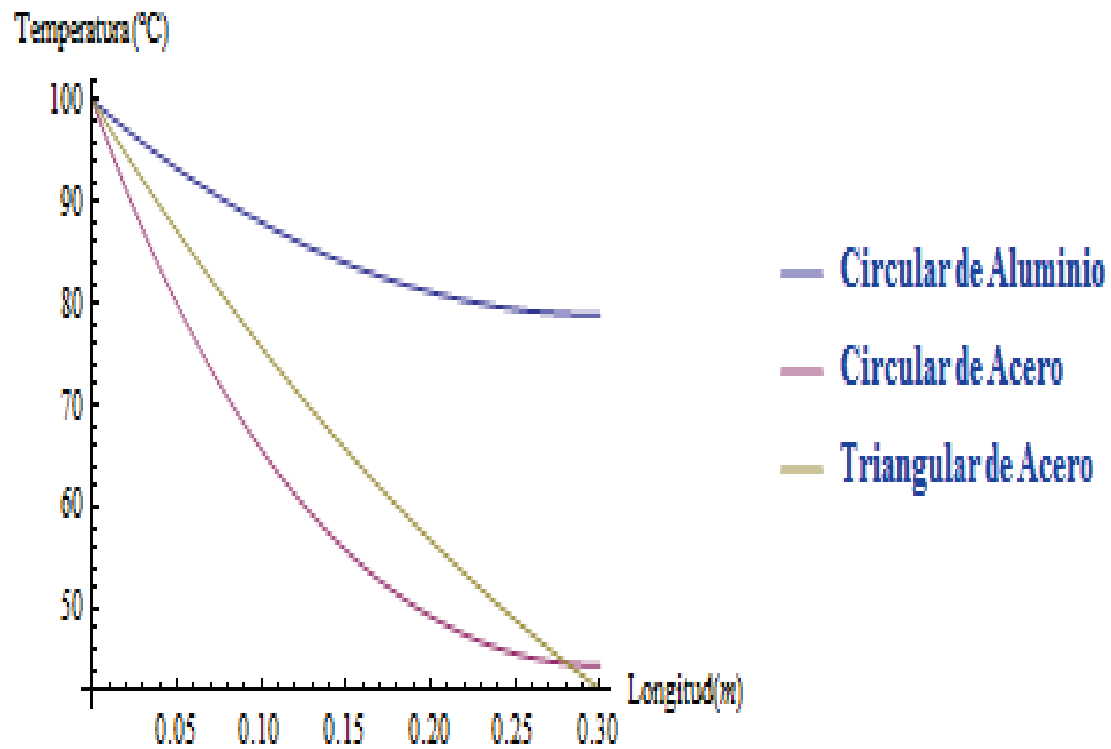
En el comando Plot, se introduce las ecuaciones para graficar. Las ecuaciones de Bessel también entran en este paso, así se tiene las curvas de distribución de temperatura para las aletas de sección circular constante y la aleta triangular.

```

Plot[{80*(Cosh[m1*(L1-x)]/Cosh[m1*L1])+T∞, 80*(Cosh[m2*(L1-x)]/Cosh[m2*L1])+T∞, 80*(BesselI[0, 2*m3*√(L1*x)]/BesselI[0, 2*m3*L1])+T∞}, {x, 0, 0.3}, PlotRange→All, AxesLabel→{Longitud[m], Temperatura[°C], AxesOrigin→{0, 0}}, PlotLegends→Automatic]

```





### CALCULO DE FLUJO DE CALOR Y EFICIENCIA DE LAS ALETAS

Transferencia de Calor "qf";

Aleta Circular de Aluminio;

$$M1 = \sqrt{h \cdot p \cdot k1} \cdot 80;$$

$$qf1 = M1 \cdot \tanh[m1 \cdot L1]$$

$$11.085910433003297$$

Aleta Circular de Acero;

$$M2 = \sqrt{h \cdot p \cdot k2} \cdot 80;$$

$$qf2 = M2 \cdot \tanh[m2 \cdot L1]$$

$$6.917596247996835$$

Aleta Triangular de Acero;

$$qf3 = k3 \cdot m3 \cdot \delta b \cdot 0.03 \cdot 80 \cdot \frac{\text{BesselI}[1,2 \cdot m3 \cdot 0.3]}{\text{BesselI}[0,2 \cdot m3 \cdot 0.3]}$$

$$7.630858592116886$$

Eficiencia de Las Aletas;

$$Lc1 = L1 + \phi/4;$$

Aleta Circular de Aluminio;

$$nf1 = \tanh[m1 \cdot Lc1] / (m1 \cdot Lc1)$$

$$0.817837766740118$$

Aleta Circular de Acero;

$$nf2 = \tanh[m2 \cdot Lc1] / (m2 \cdot Lc1)$$

$$0.5063141170525048$$

Aleta Triangular de Acero;

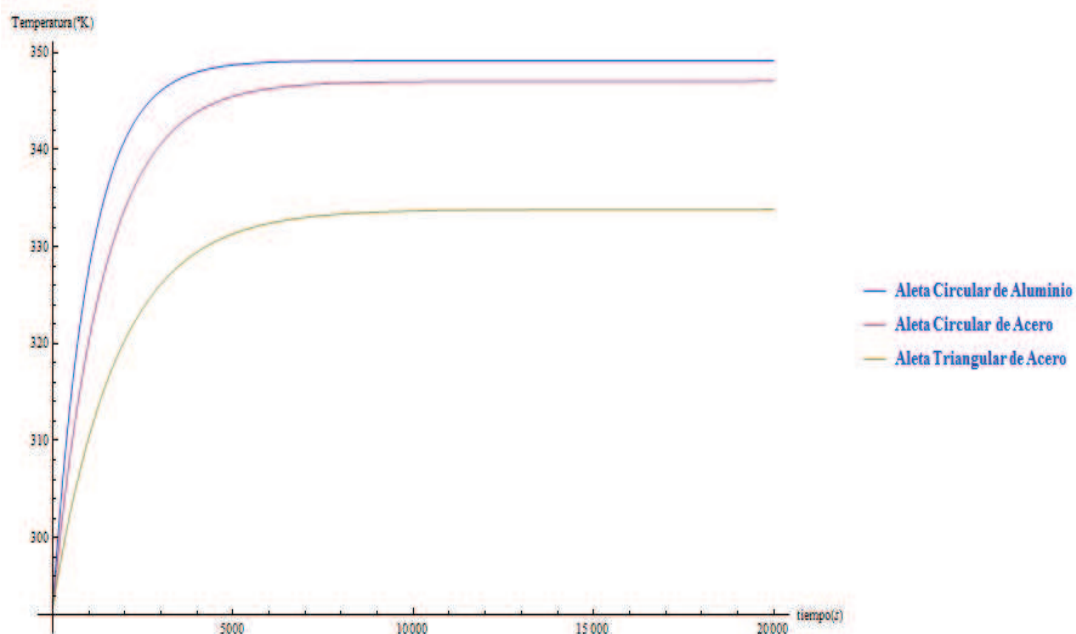
$$nf3 = \frac{1}{m3 * 0.3} * \frac{\text{Bessel}[1,2 * m3 * 0.3]}{\text{Bessel}[0,2 * m3 * 0.3]}$$

0.5928851371265079

## TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN DE LAS ALETAS

Tiempo de Estabilización para las diferentes aletas;

```
Tezt1=NDSolve[{319.48y'[x]□17.22-(0.2941(y[x]-293))-9.33*10^-11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Tezt2=NDSolve[{454.24y'[x]□17.22-(0.2941(y[x]-293))-1.86*10^-10*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Tezt3=NDSolve[{762.78y'[x]□17.22-(0.3911(y[x]-293))-2.48*10^-10*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Plot[{Evaluate[y[x]/.Tezt1],Evaluate[y[x]/.Tezt2],Evaluate[y[x]/.Tezt3}],{x,0,20000},PlotRange→All,AxesLabel→{tiempo[s],Temperatura[K],AxesOrigin→{0,0}},PlotLegends→Automatic]
```



## TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN PARA LA ALETA DE SECCIÓN CIRCULAR CONSTANTE DE ALUMINIO CON VARIAS POTENCIAS

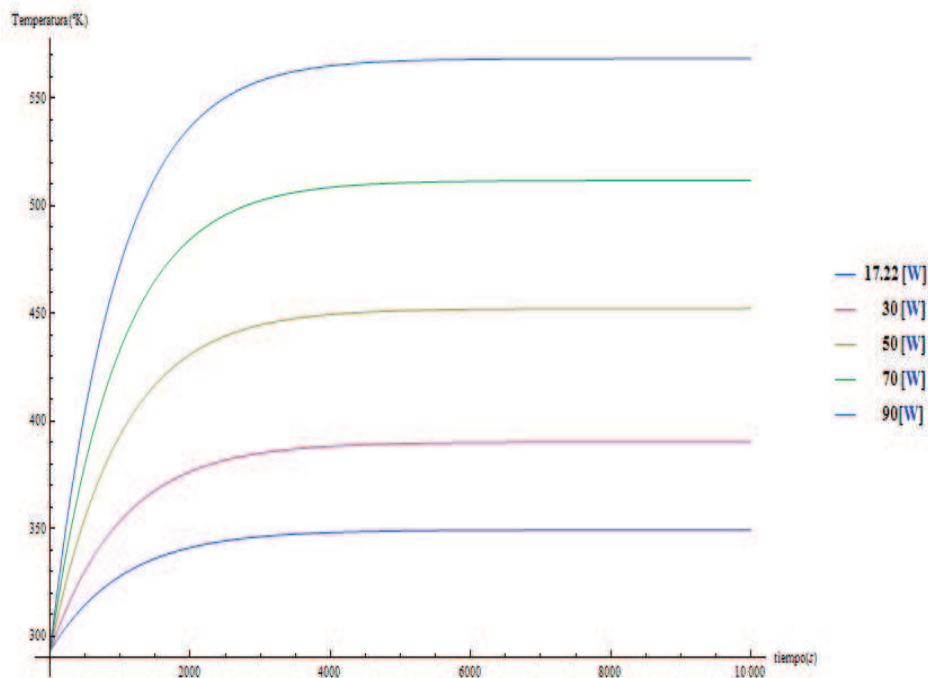
```
Pezt1=NDSolve[{319.48y'[x]□17.22-(0.2941(y[x]-293))-9.33*10^-11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Pezt2=NDSolve[{319.48y'[x]□30-(0.2941(y[x]-293))-9.33*10^-11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Pezt3=NDSolve[{319.48y'[x]□50-(0.2941(y[x]-293))-9.33*10^-11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Pezt4=NDSolve[{319.48y'[x]□70-(0.2941(y[x]-293))-9.33*10^-11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
```



```

Pezt5=NDSolve[{319.48y'[x]□90-(0.2941(y[x]-293))-9.33*10^-
11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Plot[{Evaluate[y[x]/.Pezt1],Evaluate[y[x]/.Pezt2],Evaluate[y[
x]/.Pezt3],
Evaluate[y[x]/.Pezt4],Evaluate[y[x]/.Pezt5]},{x,0,10000},Plot
Range→All,AxesLabel→{tiempo[s],Temperatura[K],AxesOrigin→{0
,0}},PlotLegends→Automatic]

```



```

Pezt4=NDSolve[{319.48y'[x]□50-(0.2941(y[x]-293))-9.33*10^-
11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
y[700]/.%
{372.766243839721}

```

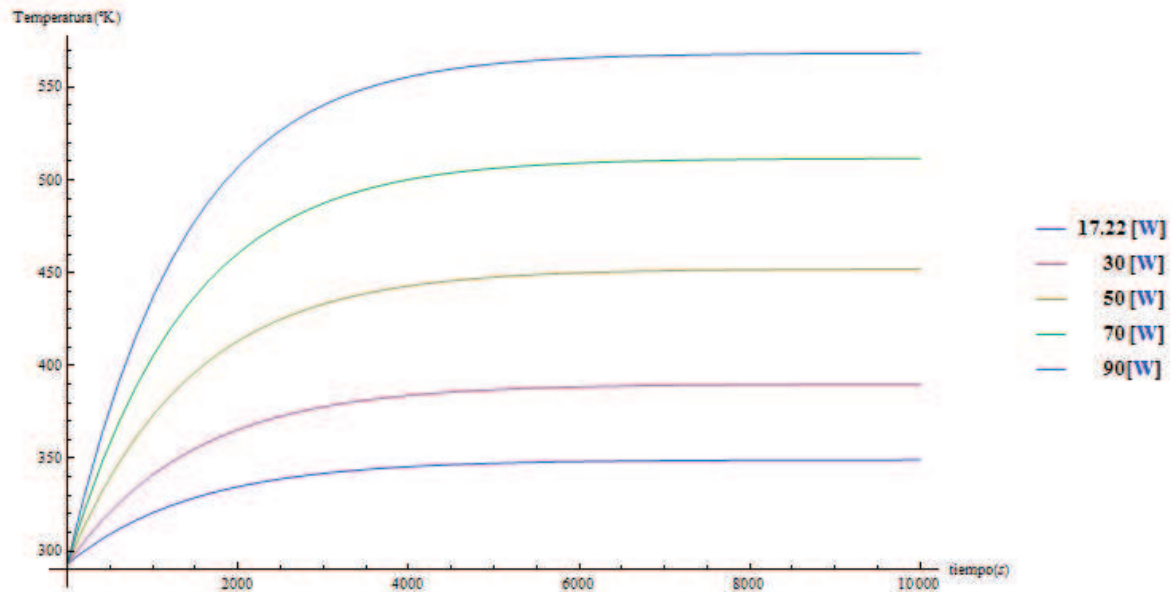
### TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN PARA LA ALETA DE SECCIÓN CIRCULAR CONSTANTE DE ACERO CON VARIAS POTENCIAS

```

Cezt1=NDSolve[{454.24y'[x]□17.22-(0.2941(y[x]-293))-9.33*10^-
11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Cezt2=NDSolve[{454.24y'[x]□30-(0.2941(y[x]-293))-9.33*10^-
11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Cezt3=NDSolve[{454.24y'[x]□50-(0.2941(y[x]-293))-9.33*10^-
11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Cezt4=NDSolve[{454.24y'[x]□70-(0.2941(y[x]-293))-9.33*10^-
11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Cezt5=NDSolve[{454.24y'[x]□90-(0.2941(y[x]-293))-9.33*10^-
11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Plot[{Evaluate[y[x]/.Cezt1],Evaluate[y[x]/.Cezt2],Evaluate[y[
x]/.Cezt3],

```

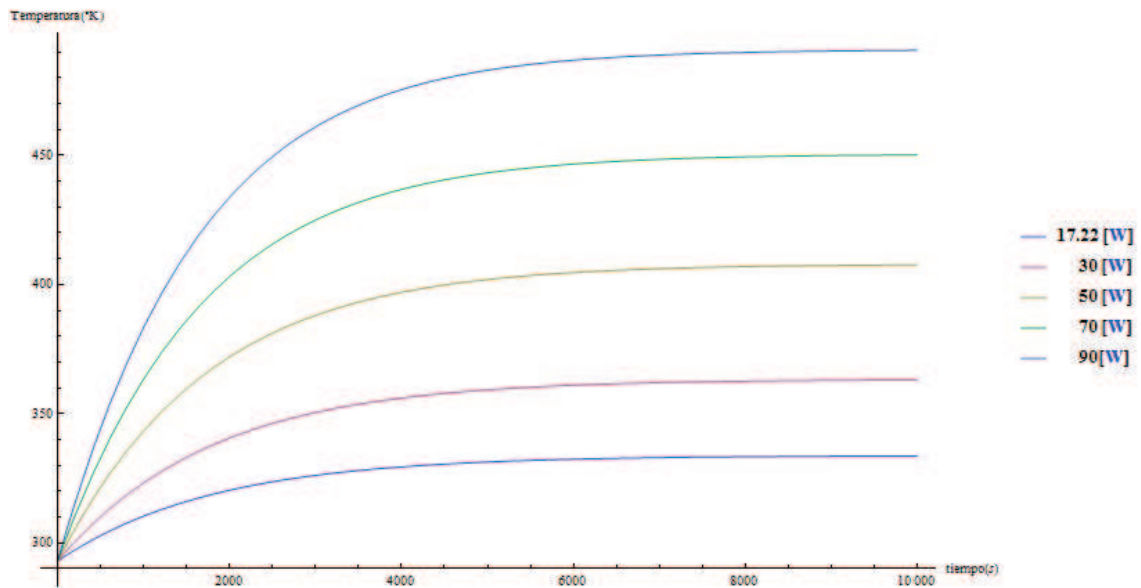
```
Evaluate[y[x]/.Cezt4], Evaluate[y[x]/.Cezt5}}, {x, 0, 10000}, Plot
Range→All, AxesLabel→{tiempo[s], Temperatura[K], AxesOrigin→{0
, 0}}, PlotLegends→Automatic]
```



```
Cezt4=NDSolve[{455y'[x]□50-(0.2941(y[x]-293))-9.33*10^-
11*(y[x]^4-293^4), y[0]□293}, y, {x, 0, 15000}];
y[1000]/.%
{372.9374844742223}
```

## TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN PARA LA ALETA DE TRIANGULAR DE ACERO CON VARIAS POTENCIAS

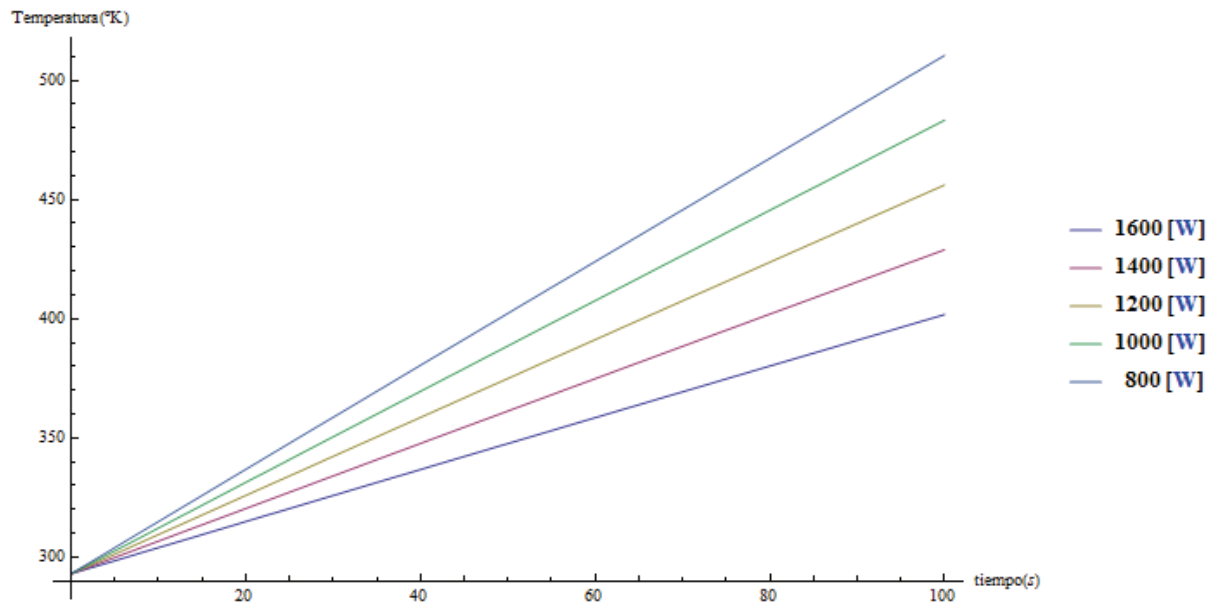
```
Trezt1=NDSolve[{762.78y'[x]□17.22-(0.3911(y[x]-293))-
2.48*10^-10*(y[x]^4-293^4), y[0]□293}, y, {x, 0, 15000}];
Trezt2=NDSolve[{762.78y'[x]□30-(0.3911(y[x]-293))-2.48*10^-
10*(y[x]^4-293^4), y[0]□293}, y, {x, 0, 15000}];
Trezt3=NDSolve[{762.78y'[x]□50-(0.3911(y[x]-293))-2.48*10^-
10*(y[x]^4-293^4), y[0]□293}, y, {x, 0, 15000}];
Trezt4=NDSolve[{762.78y'[x]□70-(0.3911(y[x]-293))-2.48*10^-
10*(y[x]^4-293^4), y[0]□293}, y, {x, 0, 15000}];
Trezt5=NDSolve[{762.78y'[x]□90-(0.3911(y[x]-293))-2.48*10^-
10*(y[x]^4-293^4), y[0]□293}, y, {x, 0, 15000}];
Plot[{Evaluate[y[x]/.Trezt1], Evaluate[y[x]/.Trezt2], Evaluate[
y[x]/.Trezt3],
Evaluate[y[x]/.Trezt4], Evaluate[y[x]/.Trezt5]}, {x, 0, 10000}, Pl
otRange→All, AxesLabel→{tiempo[s], Temperatura[K], AxesOrigin→
{0, 0}}, PlotLegends→Automatic]
```



```
Trezt3=NDSolve[{762.78y'[x]□50-(0.3911(y[x]-293))-2.48*10^-
10*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
y[2000]/.%;
{372.02527516637355}
```

### POTENCIA REQUERIDA PARA LA PLACA GENERADORA DE CALOR

```
Etab1=NDSolve[{728.82y'[x]□800-(0.1285(y[x]-293))-4.08*10^-
11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Etab2=NDSolve[{728.82y'[x]□1000-(0.1285(y[x]-293))-
4.0824*10^-11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Etab3=NDSolve[{728.82y'[x]□1200-(0.1285(y[x]-293))-4.082*10^-
11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Etab4=NDSolve[{728.82y'[x]□1400-(0.1285(y[x]-293))-
4.0824*10^-11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Etab5=NDSolve[{728.82y'[x]□1600-(0.1285(y[x]-293))-
4.0824*10^-11*(y[x]^4-293^4),y[0]□293},y,{x,0,15000}];
Plot[{Evaluate[y[x]/.Etab1],Evaluate[y[x]/.Etab2],Evaluate[y[
x]/.Etab3],Evaluate[y[x]/.Etab4],Evaluate[y[x]/.Etab5]},{x,0,
100},PlotRange→All,AxesLabel→{tiempo[s],Temperatura[K],Axes
Origin→{0,0}},PlotLegends→Automatic]
```



```

Etab5=NDSolve[{728.82y'[x]==1200-(0.1285(y[x]-293))-
4.0824*10^-11*(y[x]^4-293^4),y[0]==293},y,{x,0,15000}];
y[50]/.%
{374.94780455659037}

```

**ANEXO F: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL  
CARTUCHO CALEFACTOR**



# FIREROD®

Quality Engineered,  
Built-to-last  
Heating Solutions.

## All Cartridge Heaters Are Not the Same

When optimum heater performance is critical to your productivity and profitability, it is important that you choose a cartridge heater that meets all of the requirements for dependable performance in your most demanding applications. With Watlow's FIREROD® cartridge heater, you are guaranteed:

- Optimized design for your specific application
- Intelligent product engineering
- Tight manufacturing controls and testing to ensure product quality, reliability and consistency
- High-quality materials, manufacturing processes and construction

When you choose Watlow® as your thermal solution partner, you can count on expert application assistance and technical support throughout your project development.



# Custom EngineERed and tEstEd for Continuous rEliability

The Watlow FIREROD cartridge heater incorporates engineering excellence and is supported by almost 60 years of solid industry performance across a broad range of simple and complex applications. As the premier choice in swaged cartridge heating, thousands of industrial manufacturers continue to choose Watlow as their trusted thermal partner and certified cartridge heater supplier.

Built using premium materials and tight manufacturing process controls, the FIREROD cartridge heater provides superior heat transfer, uniform temperatures and resistance to oxidation and corrosion throughout demanding high-temperature applications.

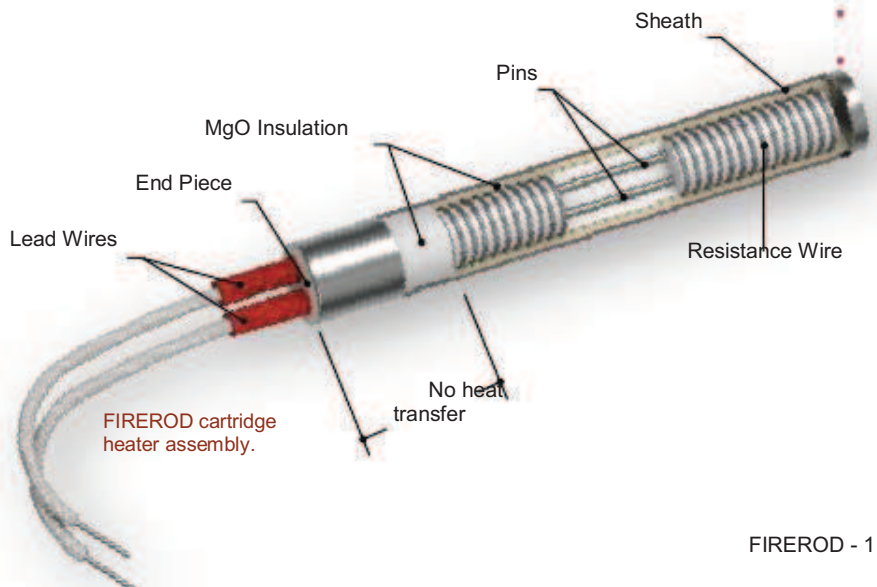
As the world's largest single source supplier of heaters, sensors and controllers, you can expect Watlow's manufacturing facilities to perform product and system testing above and beyond the competition—we do not cut corners. Every heater meets our stringent quality assurance specifications, in addition to those set forth by leading standards and regulating agencies, including the International Organization for Standardization (ISO) 9001.

Our pledge is to continuously improve design, manufacturing and delivery of the highest quality products as efficiently as possible. Our employees are committed to applying Lean manufacturing processes to eliminate waste, ensure product consistency, improve productivity, reduce lead time and control cost.



You can count on almost 60 years of Watlow engineering excellence, quality assurance, product testing and reliability inside of each FIREROD cartridge heater that leaves our manufacturing facilities.

Peter Desloge  
Watlow Chief Executive Officer



## Cartridge/Insertion Heaters

### FIREROD Cartridge Heaters

#### Heater Part Numbers

Heater Size	Heater Length (in.)	Tube (in.)	Heater (in.)	Heat Capacity (BTU)	Approx. Heat Req. (kg)	Part Number	
1/2	3	(76.0)	120	350	89 (14)	0.12 (0.054)	J3A173
1/2	3	(76.0)	240	300	78 (12)	0.12 (0.054)	J3A73
1/2	3	(76.0)	120	400	104 (16)	0.12 (0.054)	J3A132
1/2	3	(76.0)	240	400	104 (16)	0.12 (0.054)	J3A29
1/2	3	(76.0)	120	500	129 (20)	0.12 (0.054)	J3A110
1/2	3	(76.0)	240	500	129 (20)	0.12 (0.054)	J3A111
1/2	3	(76.0)	120	600	154 (24)	0.12 (0.054)	J3A51
1/2	3	(76.0)	240	600	154 (24)	0.12 (0.054)	J3A127
1/2	3	(76.0)	120	750	193 (30)	0.12 (0.054)	J3A137
1/2	3	(76.0)	240	750	193 (30)	0.12 (0.054)	J3A112
1/2	3	(76.0)	120	1000	254 (39)	0.12 (0.054)	J3A79
3/2	3	(89.0)	120	250	54 (8)	0.14 (0.064)	J3J44
3/2	3	(89.0)	240	250	54 (8)	0.14 (0.064)	J3J64
3/2	3	(89.0)	240	350	75 (12)	0.14 (0.064)	J3J65
3/2	3	(89.0)	120	500	107 (17)	0.14 (0.064)	J3J45
3/2	3	(89.0)	240	500	107 (17)	0.14 (0.064)	J3J46
3/2	3	(89.0)	240	750	162 (25)	0.14 (0.064)	J3J63
4	4	(102.0)	120	150	38 (4)	0.15 (0.068)	J4A117
4	4	(102.0)	240	150	38 (4)	0.15 (0.068)	J4A122
4	4	(102.0)	120	250	46 (7)	0.15 (0.068)	J4A118
4	4	(102.0)	240	250	46 (7)	0.15 (0.068)	J4A90
4	4	(102.0)	120	300	56 (9)	0.15 (0.068)	J4A63
4	4	(102.0)	240	300	56 (9)	0.15 (0.068)	J4A26
4	4	(102.0)	120	350	65 (10)	0.15 (0.068)	J4A1
4	4	(102.0)	240	350	65 (10)	0.15 (0.068)	J4A103
4	4	(102.0)	120	400	74 (11)	0.15 (0.068)	J4A139
4	4	(102.0)	240	400	74 (11)	0.15 (0.068)	J4A68
4	4	(102.0)	120	500	92 (14)	0.15 (0.068)	J4A16
4	4	(102.0)	120	550	100 (16)	0.15 (0.068)	J4A242
4	4	(102.0)	240	500	92 (14)	0.15 (0.068)	J4A92
4	4	(102.0)	120	750	138 (21)	0.15 (0.068)	J4A195
4	4	(102.0)	240	750	138 (21)	0.15 (0.068)	J4A119
4	4	(102.0)	240	1000	194 (29)	0.15 (0.068)	J4A73
4 1/2	4 1/2	(114.0)	120	500	80 (12)	0.17 (0.077)	J4J69
4 1/2	4 1/2	(114.0)	240	500	80 (12)	0.17 (0.077)	J4J57
4 1/2	4 1/2	(114.0)	120	750	120 (19)	0.17 (0.077)	J4J70
4 1/2	4 1/2	(114.0)	240	750	120 (19)	0.17 (0.077)	J4J32
5	5	(127.0)	120	200	29 (4)	0.19 (0.096)	J5A85
5	5	(127.0)	240	200	29 (4)	0.19 (0.096)	J5A74
5	5	(127.0)	120	350	50 (8)	0.19 (0.096)	J5A86
5	5	(127.0)	240	350	50 (8)	0.19 (0.096)	J5A63
5	5	(127.0)	120	400	56 (9)	0.19 (0.096)	J5A98
5	5	(127.0)	240	400	56 (9)	0.19 (0.096)	J5A46
5	5	(127.0)	120	500	72 (11)	0.19 (0.096)	J5A52
5	5	(127.0)	240	500	72 (11)	0.19 (0.096)	J5A45
5	5	(127.0)	120	750	106 (17)	0.19 (0.096)	J5A121
5	5	(127.0)	240	750	106 (17)	0.19 (0.096)	J5A72
5	5	(127.0)	240	1000	143 (22)	0.19 (0.096)	J5A87
5 1/2	5 1/2	(140.0)	240	200	25 (4)	0.20 (0.091)	J5J38
5 1/2	5 1/2	(140.0)	120	500	64 (10)	0.20 (0.091)	J5J43
5 1/2	5 1/2	(140.0)	240	500	64 (10)	0.20 (0.091)	J5J33
5 1/2	5 1/2	(140.0)	240	650	83 (13)	0.20 (0.091)	J5J69

RAPID SHIP heaters are manufactured to standard specifications. 12 inch crimped on GGS leads supplied unless otherwise specified.

**RAPID SHIP**

• Next day shipment



## Cartridge/Insertion Heaters

### FIREROD Cartridge Heaters

#### Maximum Allowable Watt Density

The following four charts detail maximum allowable watt densities for applications that use metal, steam, air or gas heating. Please review the charts and applicable data to determine the correct watt density for your application.

#### Correction Factors

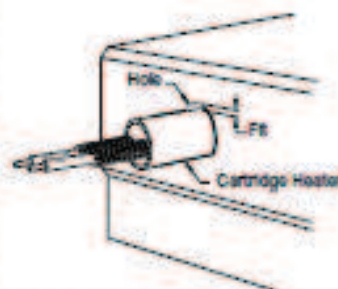
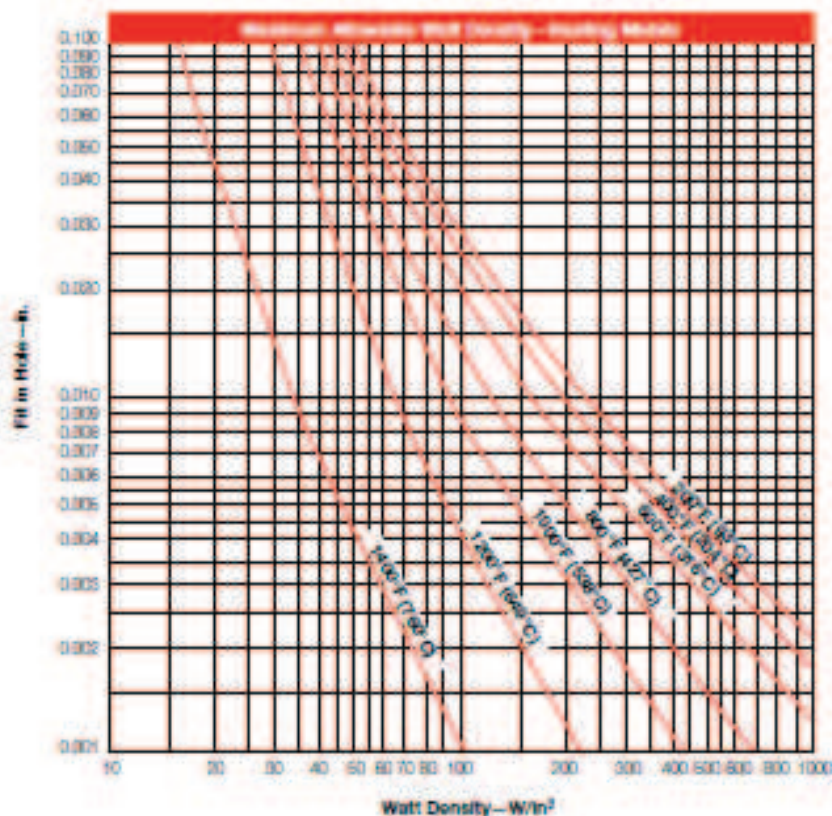
These graphs depict FIRERODs used in steel parts, therefore, for stainless steel, aluminum or brass, refer to applicable correction factors:

1. For stainless steel, enter the graph with a fit 0.0015 in. (0.04 mm) larger than actual fit.
2. For aluminum and brass, enter the graph with a temperature 100°F (38°C) above actual temperature.

#### Heating Metals

The *Maximum Watt Density – Heating Metals* chart will display the maximum hole fit or recommended watt density of the heater. Enter the chart with either known variable, part-fit-in-hole dimension or  $W/in^2$ . Then, find the application temperature by reading up or over on the chart.

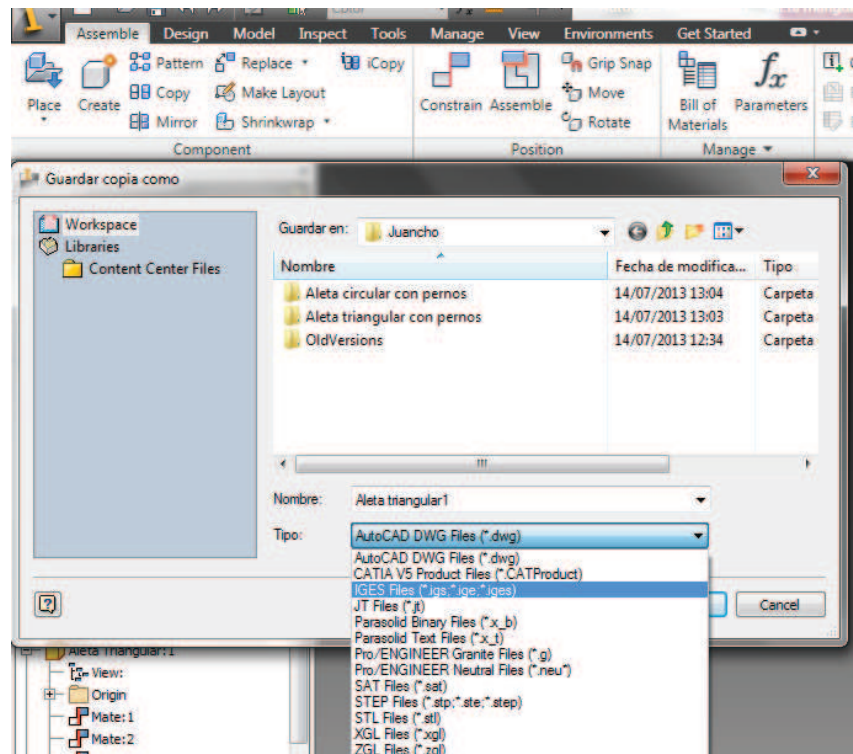
If the fit of the heater in the hole dimension is not known, it can be easily determined. Subtract the minimum diameter of the FIREROD (nominal diameter minus tolerance) from the maximum hole diameter. For example, the hole fit is 0.006 in. (0.15 mm) for a hole diameter of 0.500 in. (12.7 mm) minus a heater diameter of 0.496 in. (12.6 mm)  $\pm 0.002$  in. (0.05 mm). For FIREROD heaters in square holes or grooves, contact your Watlow representative for the fit in hole dimension.



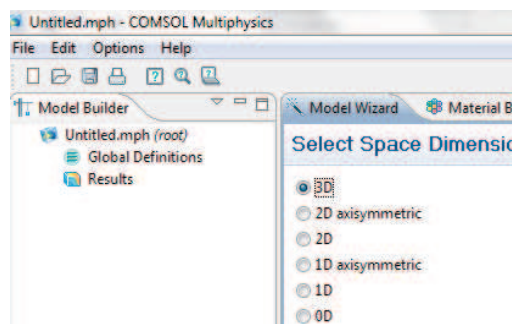
Fit in hole = maximum hole I.D. minus minimum heater O.D.

## ANEXO G. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

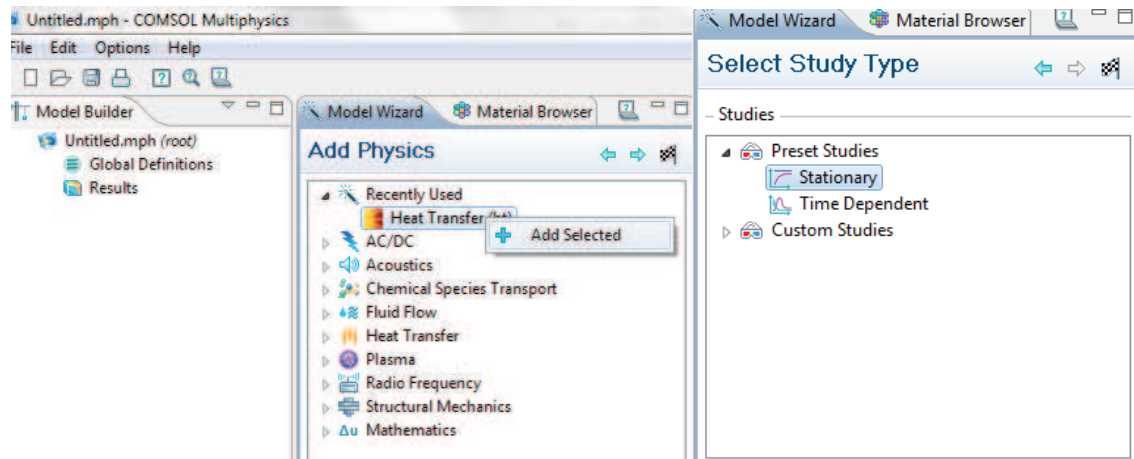
Se debe tener presente que para la construcción del sólido que va a ser simulado es mucho más fácil construirlo en programas que utilicen la interfaz CAD. Se utiliza el programa INVENTOR 2012 para construir el sólido. Luego se guarda el archivo en el formato IGES, para que el programa COMSOL 4.0 lo pueda abrir.



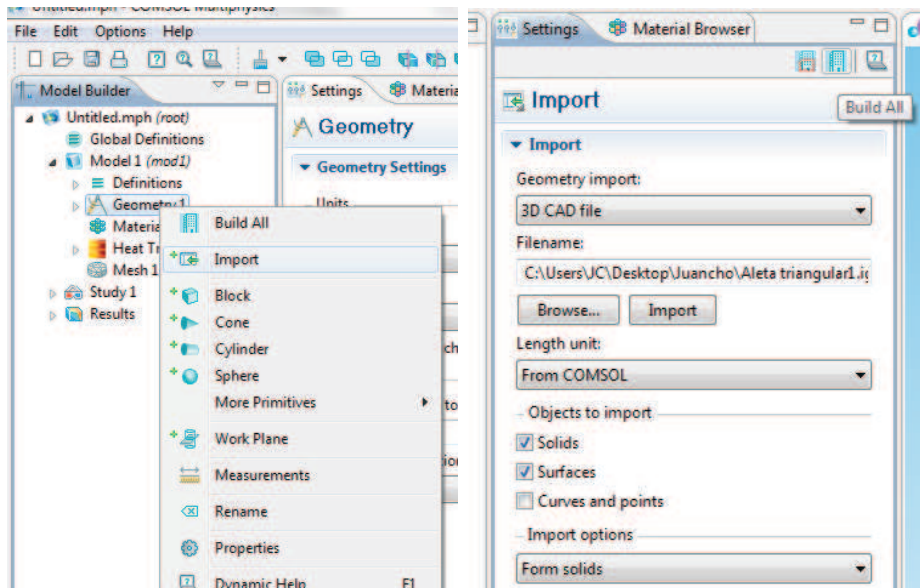
Una vez que se obtiene el archivo en formato IGES se abre COMSOL 4.0 y se selecciona en cuantos planos va a ser el análisis.



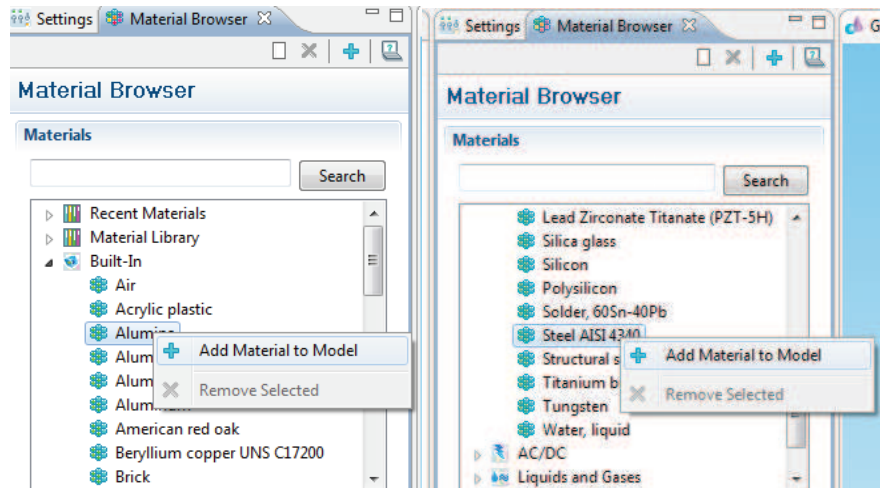
Se selecciona el módulo Heat Transfer en estado estacionario.



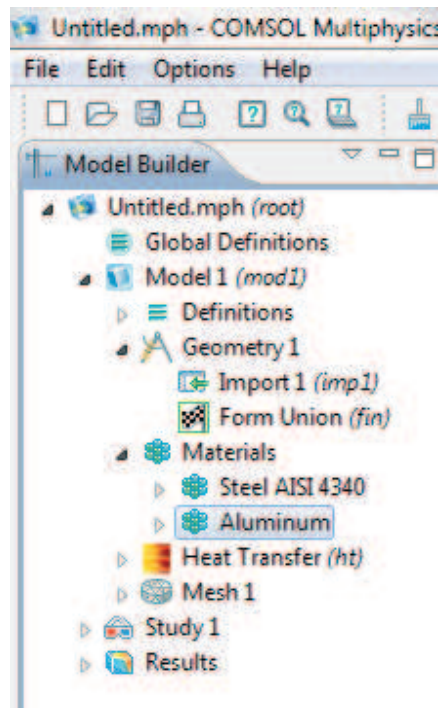
Al finalizar aparecerá una nueva ventana se selecciona el icono de geometría y se importar el formato IGES. A continuación se construye el sólido.



Ahora con click derecho sobre el material que se necesita se admite el material o los materiales, en este caso serán aluminio y acero.

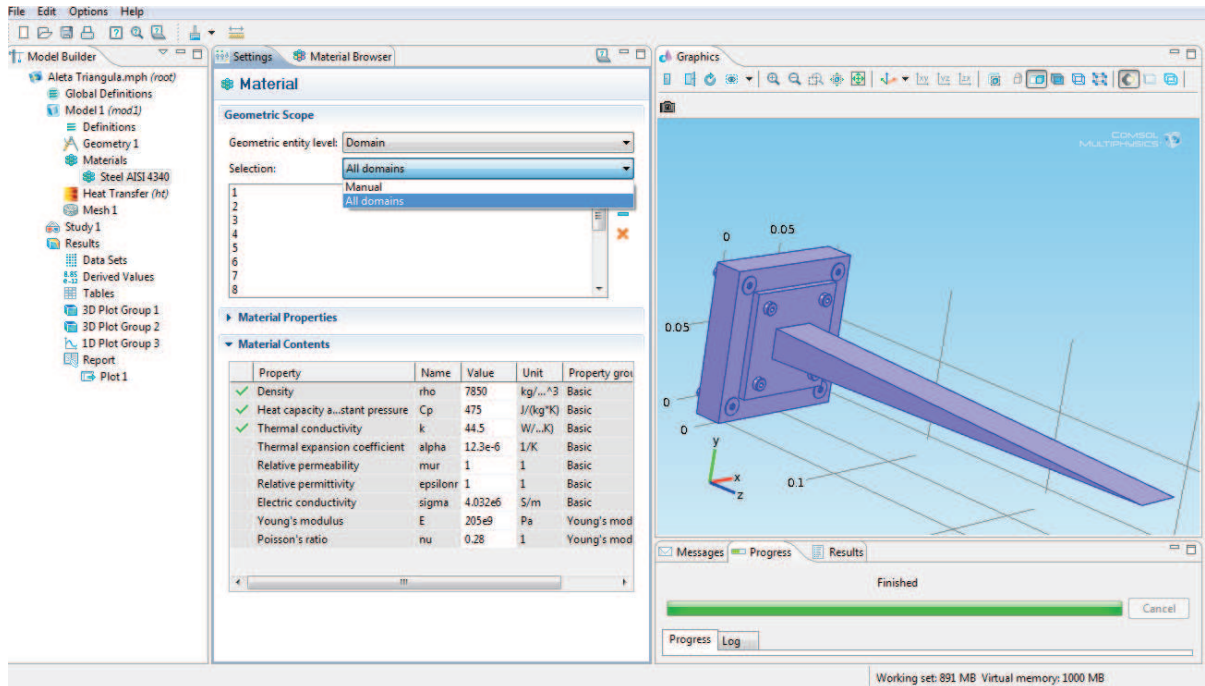


Se verifica que los materiales escogidos estén en la ventana de trabajo

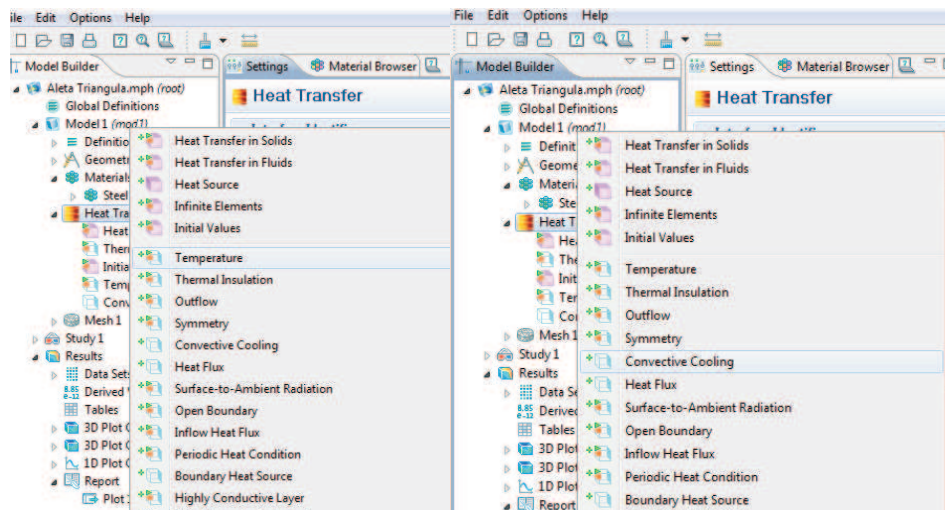


Se selecciona las superficies que se necesita que sean de un material específico. Las propiedades del material pueden ser manipulados en este caso se introduce las propiedades propias de las aletas construidas.

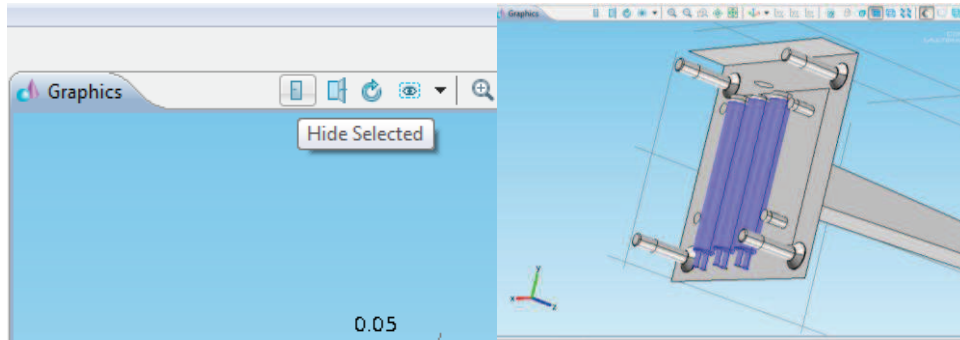




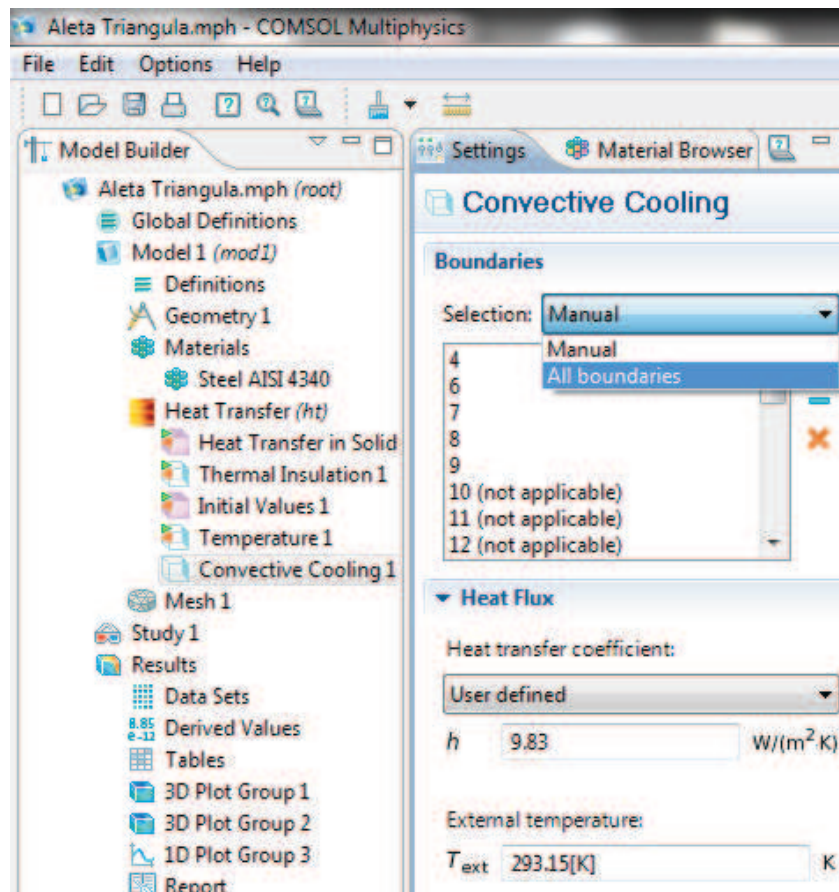
Se selecciona el módulo de Heat Transfer y se admiten nuevos parámetros de análisis, temperatura y convección.



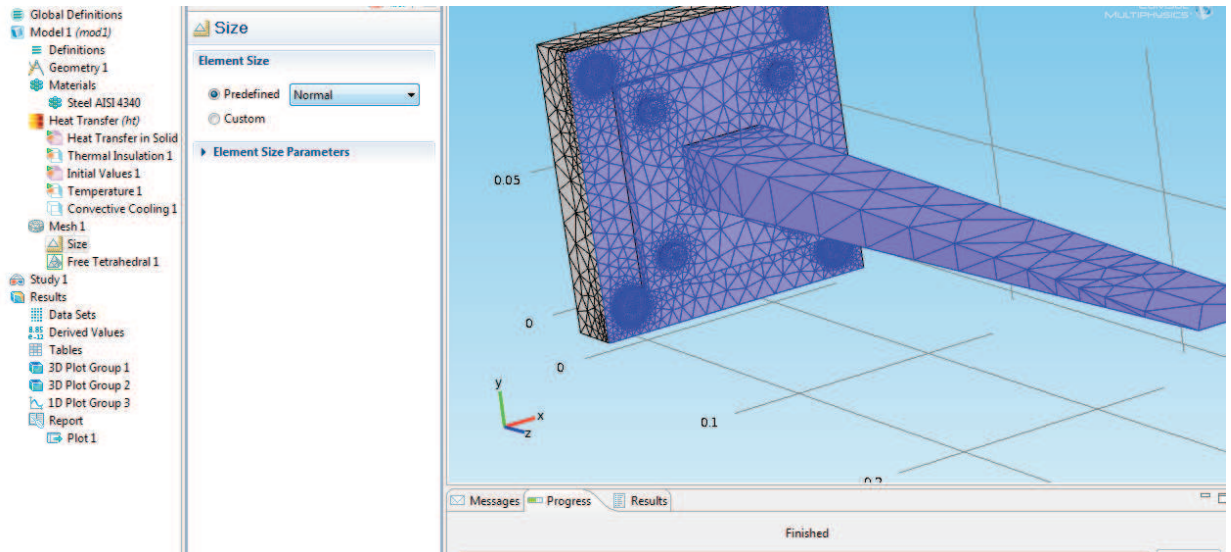
Se procede a poner la temperatura de 373.15 K en la base de la aleta. Para tener más precisión en el modelo se selecciona toda la superficie de los cartuchos calefactores, para tener acceso a estas superficies se usa la herramienta Hide Selected.



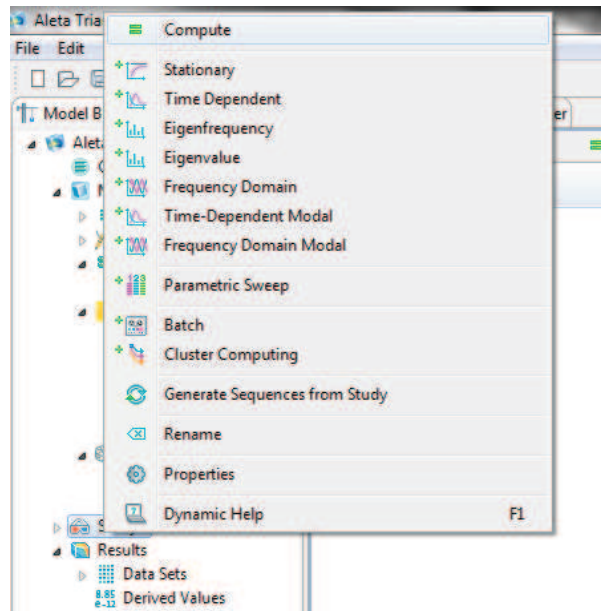
Se introduce el dato de convección  $8.938 \left[ \frac{w}{m^2 \cdot k} \right]$ ; se selecciona todas las superficies y luego se desmarca a aquellas superficies que estarán aisladas por la manta de Nutec Fibratec. Por defecto el programa a esas superficies las aislara.



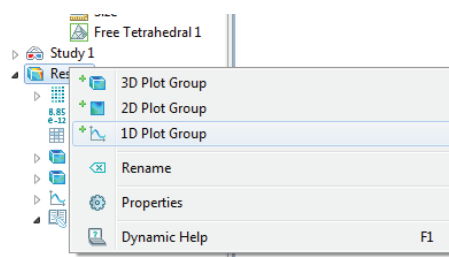
Se procede a elaborar el mallado, es recomendable usar el que está por defecto, a menos que sean superficies extremadamente grandes.



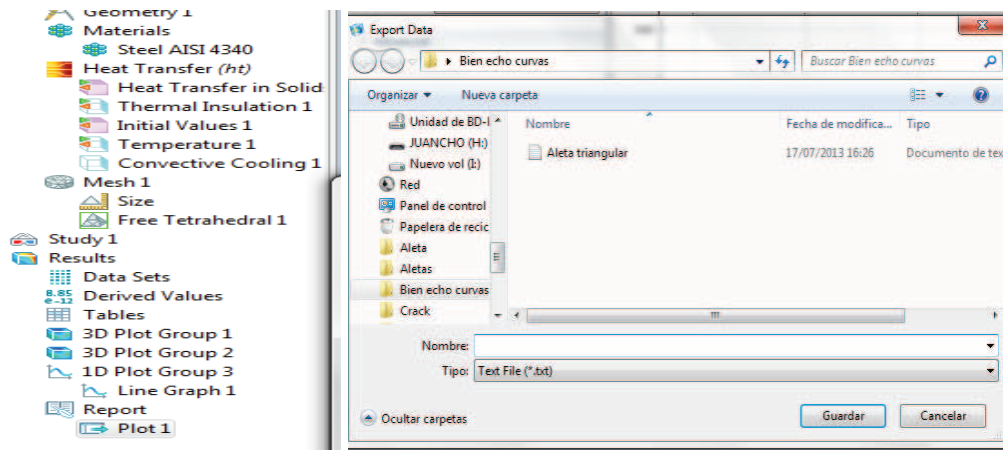
Sobre el icono de estudio se da click derecho y se seleccionan compute.



Se esperan los resultados y sobre el icono de Resultado se da click derecho y se selecciona 1D Plot Group

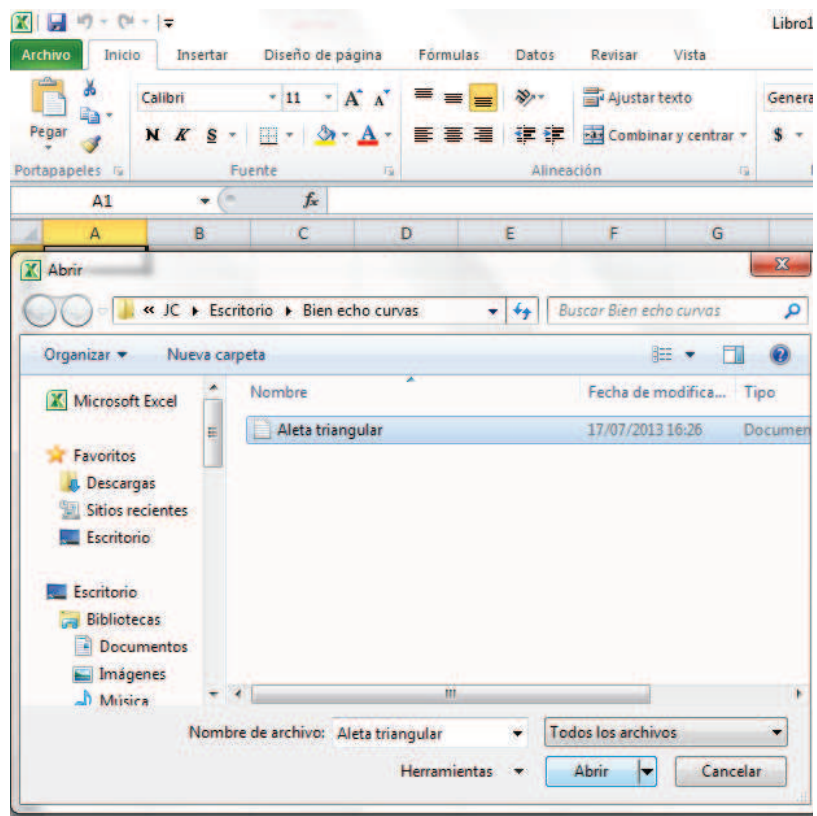


Ahora en el icono de reporte seleccionamos la gráfica y se guarda como archivo .txt.



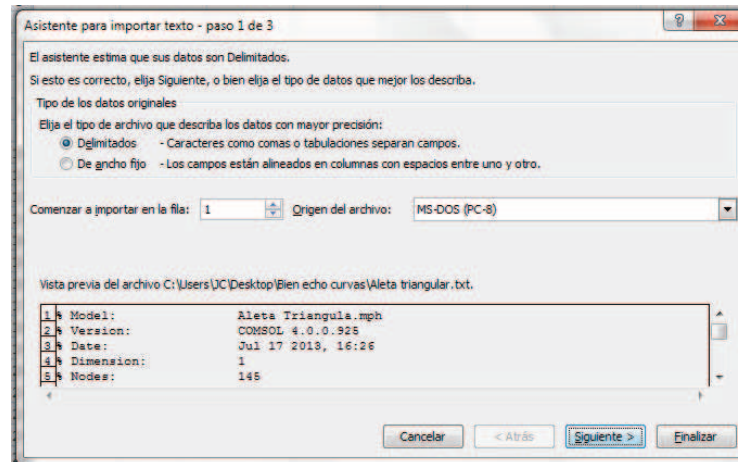
## OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE COMSOL A EXCEL

Se abre una hoja de cálculo de Excel y luego se procede a abrir el archivo en formato txt.

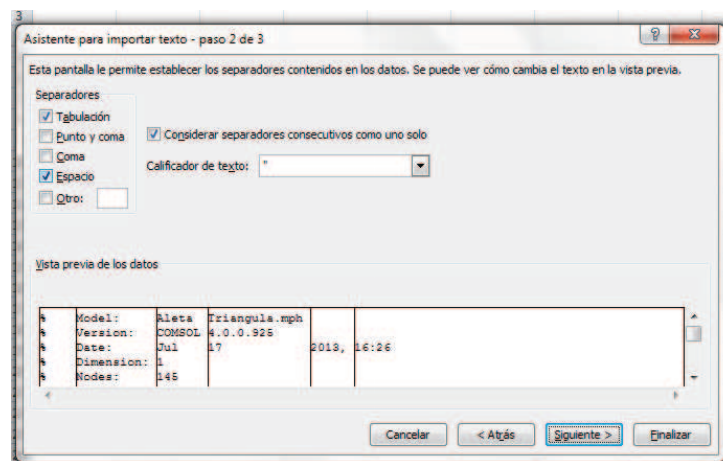




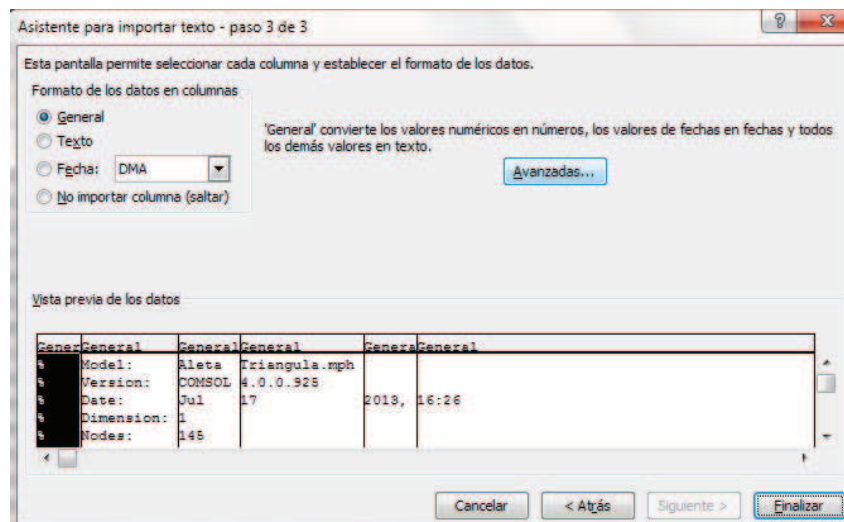
Aparece la siguiente ventana.



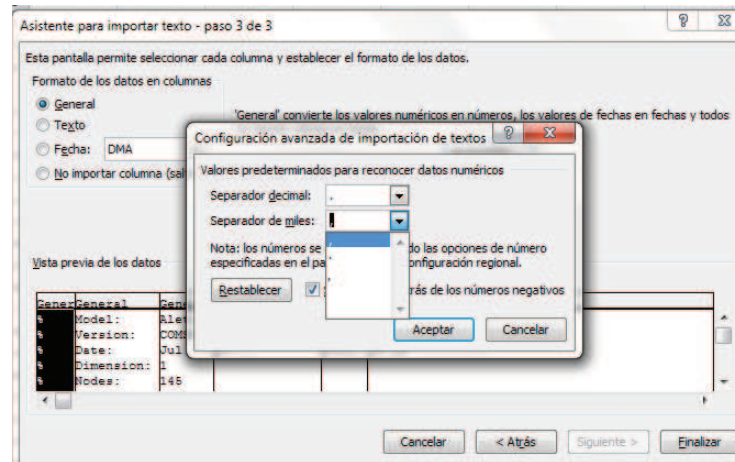
Se selecciona el punto de espacio.



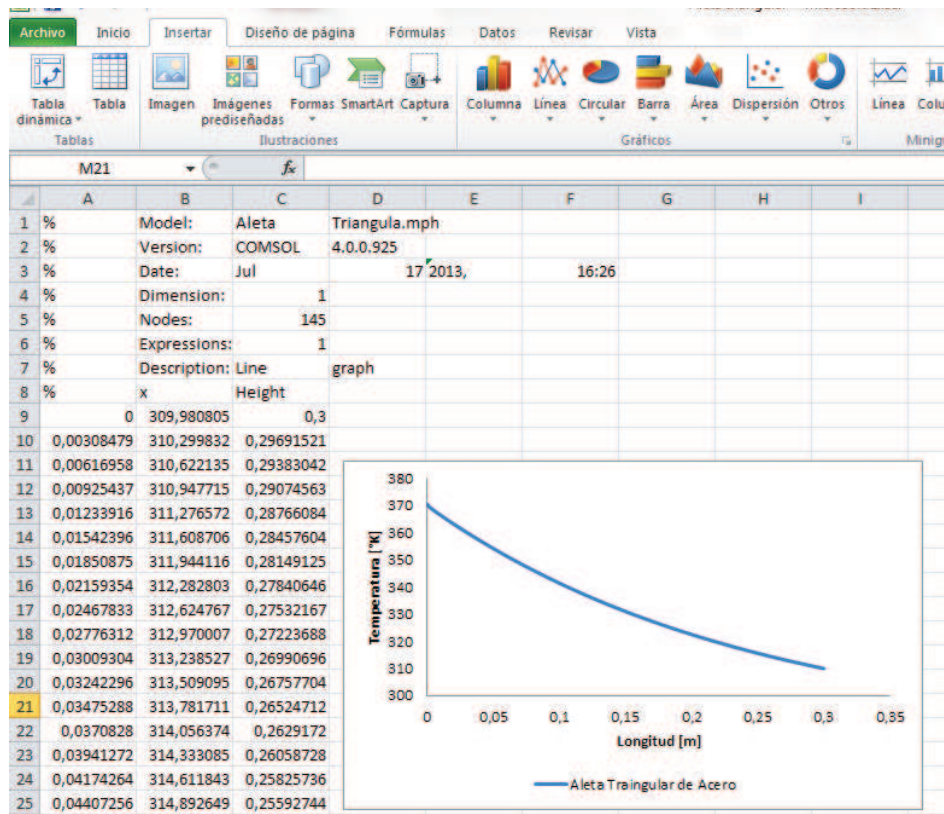
Se da click en avanzado.



Aparecerá un cuadro donde se cambia la coma por punto el punto por coma.



Se finaliza y se observa los datos de COMSOL en una tabla de EXCEL.



## ANEXO H: ESPECIFICACIONES DE LAS TERMOCUPLAS

La se utilizó 4 termocuplas con las siguientes características (Maz cr.com, 20193).







## DESCRIPCIÓN

- Tipo: K
- Diámetro: 3/16" (5mm)
- Longitud. Largo de la Espiga: 4" (100 mm)
- Material: Acero Inoxidable
- Conexión: 5/16"
- Temperatura. Rango: 0~ 450°C
- Aislamiento & Protección: FB-SSB
- Longitud del cable: 2 m
- Hecho en: China

**ANEXO I: TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI  
USB 6009**

## NI USB-6009

### DAQ Multifunción de Bajo Costo de 14 Bits, 48 kS/s

- 8 entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s)
  - 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s), 12 E/S digitales; contador de 32 bits
  - Energizado por bus para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada
  - La versión OEM está disponible
  - Compatible con LabVIEW, LabWindows/CVI y Measurement Studio para Visual Studio .NET
  - Software controlador NI-DAQmx y software interactivo NI LabVIEW SignalExpress LE para registro de datos



## Información General

El USB-6009 de National Instruments brinda funcionalidad de adquisición de datos básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Es accesible para uso de estudiantes y lo suficientemente poderoso para aplicaciones de medida más sofisticadas. Para usuarios de Mac OS X y Linux, descargue el software NI-DAQmx Base y programe el USB-6009 con LabVIEW o C.

Para cursos suplementarios con experimentos prácticos sobre teoría de simulación, medidas y automatización, NI desarrolló un Paquete de Estudiante USB-6009 que incluye una copia de LabVIEW Edición de Estudiante. Estos paquetes son exclusivamente para estudiantes, proporcionándoles una herramienta de aprendizaje potente, práctica y a bajo costo. Visite la página de productos académicos de NI en <http://www.ni.com/academic/measurements.htm> para más detalles.

Para un muestreo más rápido, medidas más precisas, soporte para calibración y mayor número de canales, considere los dispositivos de adquisición de datos de alto rendimiento energizados por bus USB, NI USB-6210 y NI USB-6211.

Cada dispositivo USB de adquisición de datos incluye una copia de NI LabVIEW SignalExpress LE así usted puede adquirir, analizar y presentar datos rápidamente sin programación. Además de LabVIEW SignalExpress, los módulos de adquisición de datos por USB son compatibles con las siguientes versiones (o posteriores) de software de aplicación - LabVIEW 7.x, LabWindows™/CVI 7.x o Measurement Studio 7.x. Los módulos USB de adquisición de datos también son compatibles con Visual Studio .NET, C/C++ y Visual Basic 6.

## Especificaciones

### Documentos con Especificaciones

- Especificaciones (2)
- Hoja de Especificaciones
- **Resumen de Especificaciones**

General	
Producto	USB-6009
Familia de Productos	DAQ Multifunción
Formato Físico	USB
Número de Parte	779026-01
Sistema Operativo/Objetivo	Linux , Mac OS , Pocket PC , Windows
Familia de Productos DAQ	Serie B
Tipos de Medida	Voltaje
Tipo de Aislamiento	None
Compatibilidad con RoHS	Sí
Potencia USB	Energizado por Bus

<b>Entrada Analógica</b>	
<b>Canales</b>	4 , 8
<b>Canales de una sola terminal</b>	8
<b>Canales Diferenciales</b>	4
<b>Resolución</b>	14 bits
<b>Velocidad de Muestreo</b>	48 kS/s
<b>Rendimiento (Todos los Canales)</b>	48 kS/s
<b>Máx. Voltaje de Entrada Analógica</b>	10 V
<b>Rango de Voltaje Máximo</b>	-10 V , 10 V
<b>Precisión Máxima del Rango de Voltaje</b>	7.73 mV
<b>Rango de Voltaje Mínimo</b>	-1 V , 1 V
<b>Mínima Precisión del Rango de Voltaje</b>	1.53 mV
<b>Número de Rangos</b>	8
<b>Muestreo Simultáneo</b>	No
<b>Memoria Interna</b>	512 B
<b>Salida Analógica</b>	
<b>Canales</b>	2
<b>Resolución</b>	12 bits
<b>Máx. Voltaje de Entrada Analógica</b>	5 V
<b>Rango de Voltaje Máximo</b>	0 V , 5 V
<b>Precisión Máxima del Rango de Voltaje</b>	7 mV
<b>Rango de Voltaje Mínimo</b>	0 V , 5 V
<b>Mínima Precisión del Rango de Voltaje</b>	7 mV
<b>Razón de Actualización</b>	150 S/s
<b>Capacidad de Corriente Simple</b>	5 mA
<b>Capacidad de Corriente Total</b>	10 mA
<b>E/S Digital</b>	
<b>Canales Bidireccionales</b>	12
<b>Canales de Entrada Únicamente</b>	0
<b>Canales de Salida Únicamente</b>	0
<b>Temporización</b>	Software

Niveles Lógicos	TTL
Entrada de Flujo de Corriente	Sinking , Sourcing
Salida de Flujo de Corriente	Sinking , Sourcing
Filtros de Entrada Programables	No
¿Soporta Estados de Encendido Programables?	No
Capacidad de Corriente Simple	8.5 mA
Capacidad de Corriente Total	102 mA
Temporizador Watchdog	No
¿Soporta Protocolo de Sincronización para E/S?	No
¿Soporta E/S de Patrones?	No
Máximo Rango de Entrada	0 V , 5 V
Máximo Rango de Salida	0 V , 5 V
<b>Contadores/Temporizadores</b>	
Número de Contadores/Temporizadores	1
Operaciones a Búfer	No
Eliminación de Rebotes	No
Sincronización GPS	No
Rango Máximo	0 V , 5 V
Frecuencia Máxima de la Fuente	5 MHz
Generación de Pulso	No
Resolución	32 bits
Estabilidad de Tiempo	50 ppm
Niveles Lógicos	TTL
<b>Especificaciones Físicas</b>	
Longitud	8.51 cm
Ancho	8.18 cm
Altura	2.31 cm
Conector de E/S	Terminales de tornillo
<b>Temporización/Disparo/Sincronización</b>	
Disparo	Digital
Bus de Sincronización (RTSI)	No



## **ANEXO J: PROGRAMACIÓN EN LABVIEW**

## DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

### LABVIEW

Se lo llama también lenguaje G. La mayoría de lenguajes están basados en una programación imperativa, la cual es una sucesión de operaciones, el lenguaje G no usa una programación imperativa, utiliza una ejecución basada en un flujo de datos (dataflow).

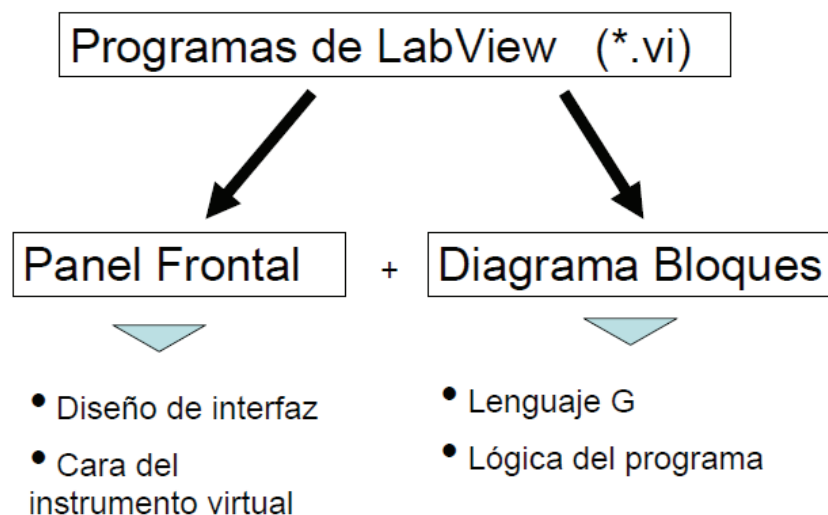
Un programa en LabView consiste en una serie de funciones unidas mediante cables, los datos circulan por estos cables así una función solo podrá ejecutarse si tiene disponible todos los datos que le sirven como entrada.

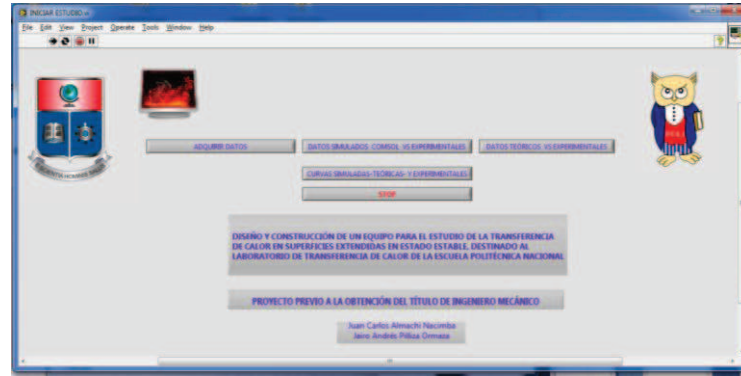
### DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES FUNCIONES

LabView posee dos ventanas Front Panel y Block Diagram

#### FRON PANEL

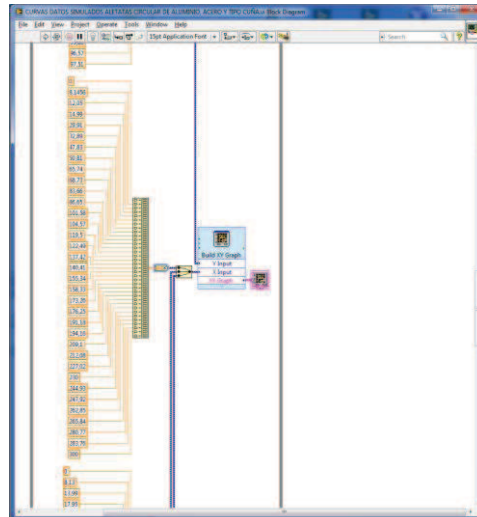
Es una combinación de controles e indicadores. Los controles entregan datos al diagrama, a través de bloques desde el panel frontal, por entrada desde teclas o un mouse, los indicadores entregan datos desde el panel frontal, a través del diagrama de bloques para ser simulados en el display.





## BLOCK DIAGRAM

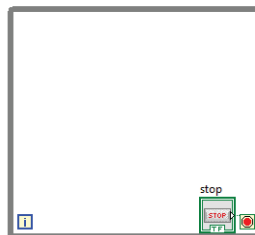
En esta ventana se puede editar el programa a través de sus diagramas de bloques.



## PRINCIPALES FUNCIONES UTILIZADAS EN LA PROGRAMACIÓN.

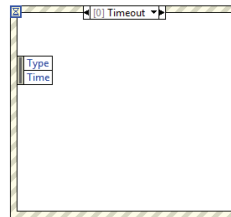
### While loop

Este bucle repetirá el código de su interior hasta que se cumpla una condición, la cual es evaluada en cada interacción.



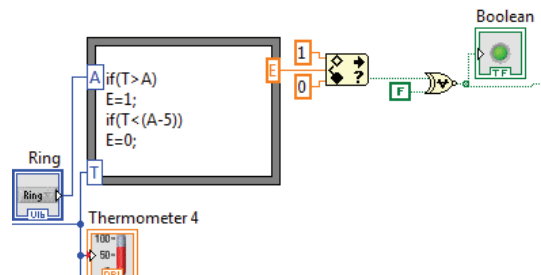
## Event

Tiene varios subdiagramas y se ejecutan correspondientemente, este permite congelar la ejecución, de hilo del programa hasta que se dé una condición, es decir detiene la ejecución hasta que se presente el evento.



## Formula Node

A diferencia de las anteriores, formula node no controla el flujo de ejecución, evalúa una expresión matemática escrita como texto, con una sintaxis parecida al lenguaje C.



## UBICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

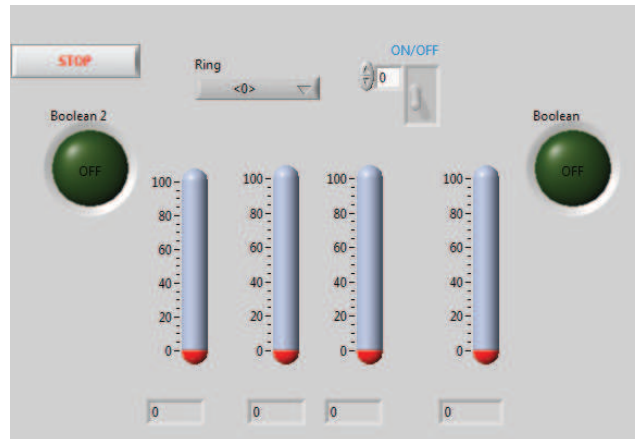
Las estructuras antes mencionadas se encuentran dando clic derecho sobre la ventana block diagrama en las ventanas siguientes.



## TIPOS DE DATOS

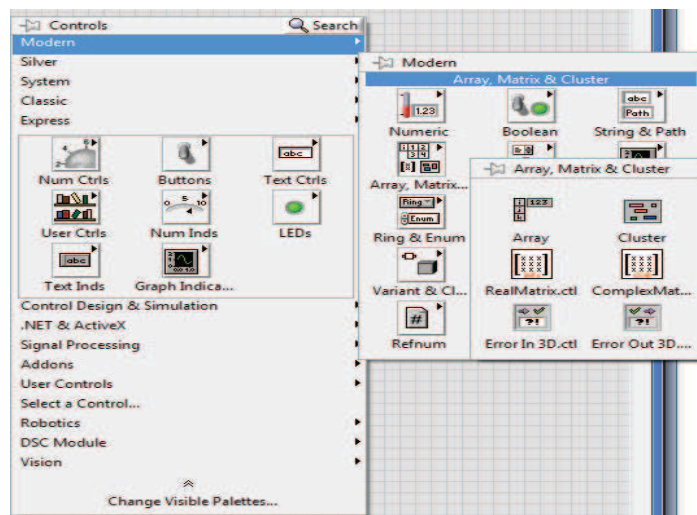
### Boolean

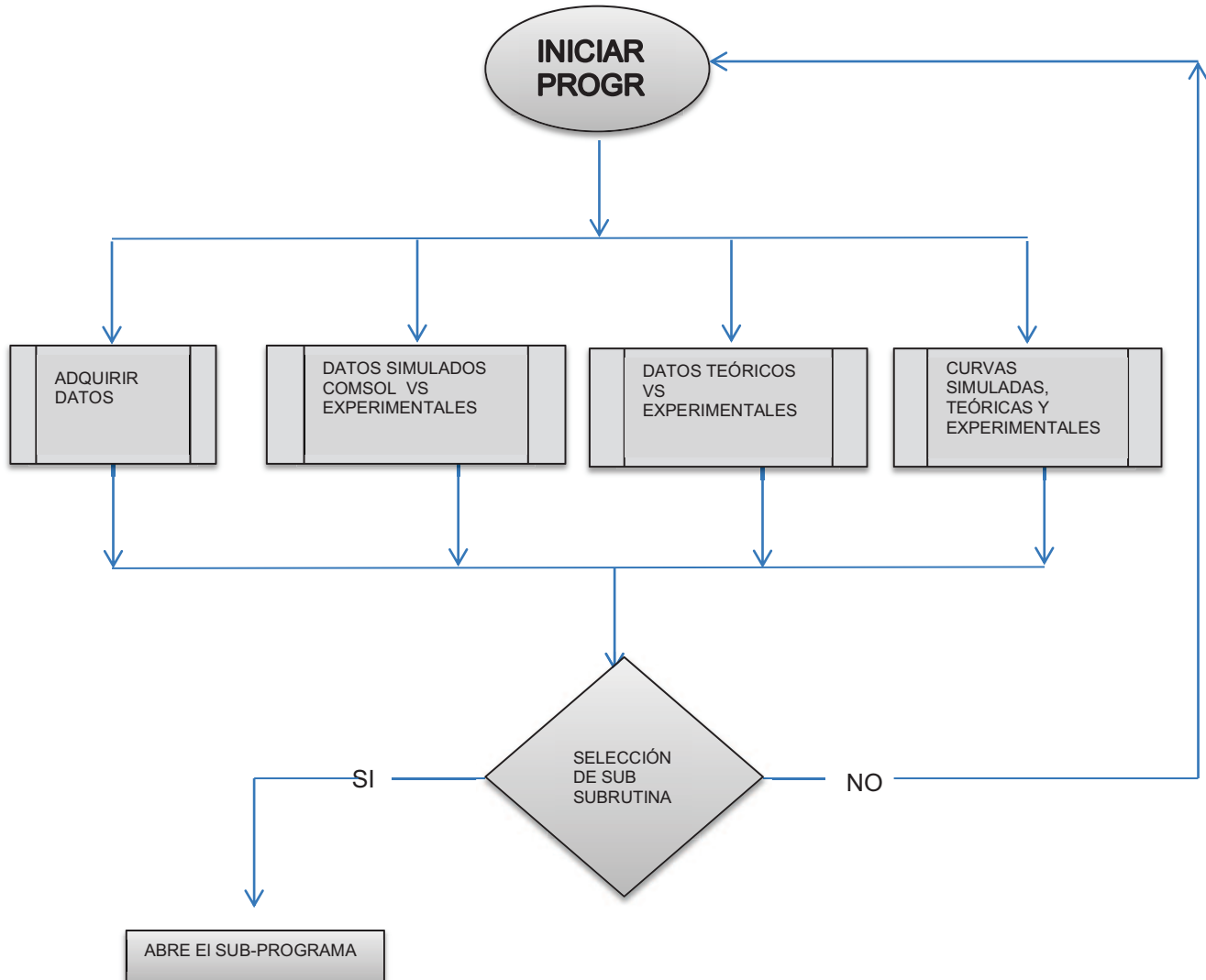
Datos de valor único verdadero o falso, debido a esto pueden utilizarse como controles con forma de botón o pelador.



### Arrays

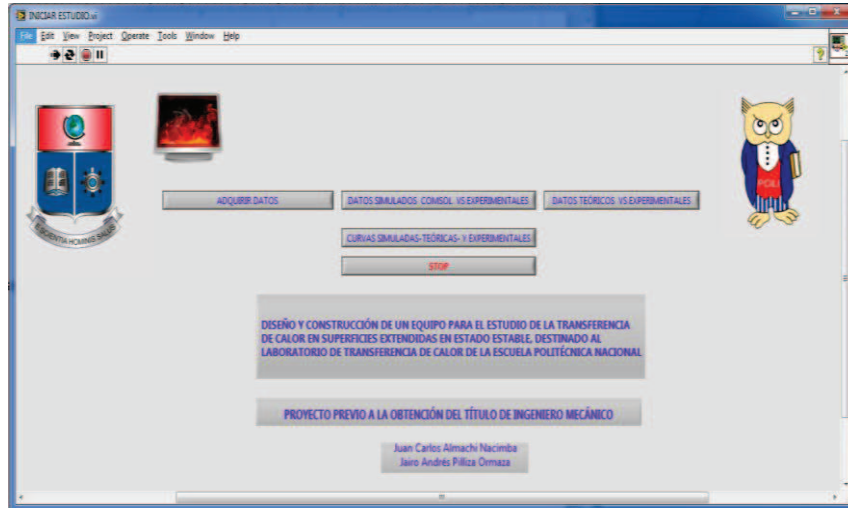
Son arreglos de un conjunto de datos, de semejante naturaleza, es decir, booleanos, strings, etc.



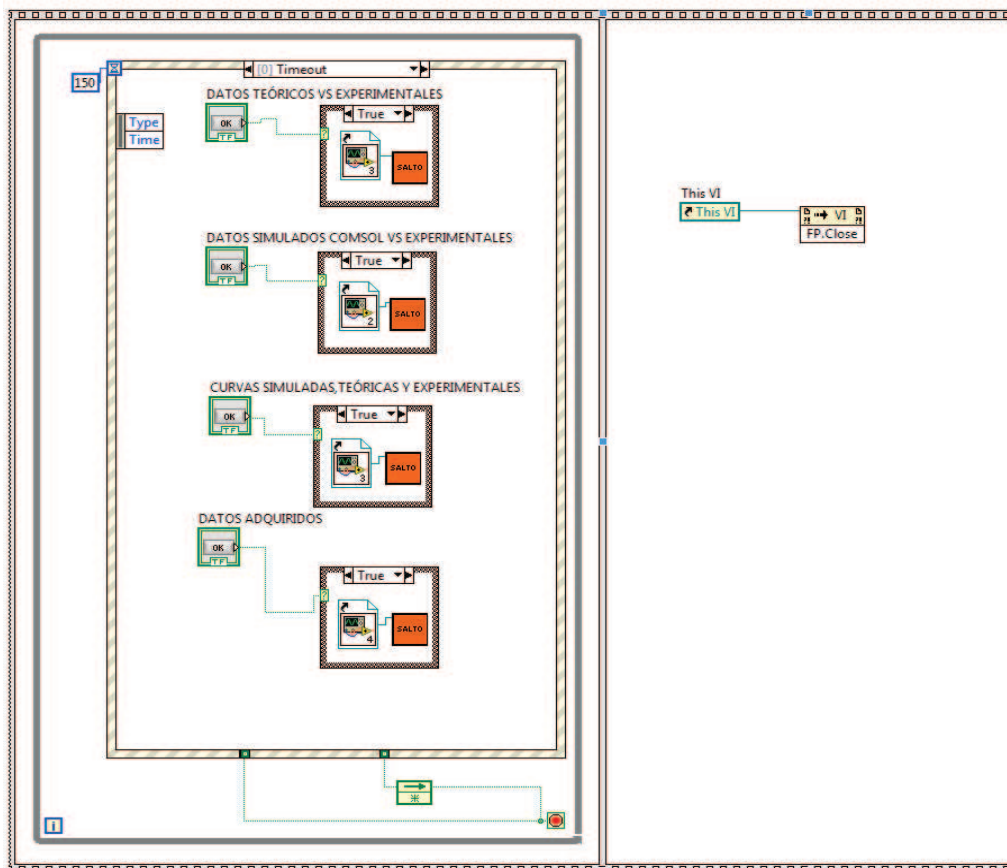
**PROGRAMA EN LABVIEW****SUB-RUTINA INICIAR ESTUDIO, SELECCIÓN DE MENÚ.**

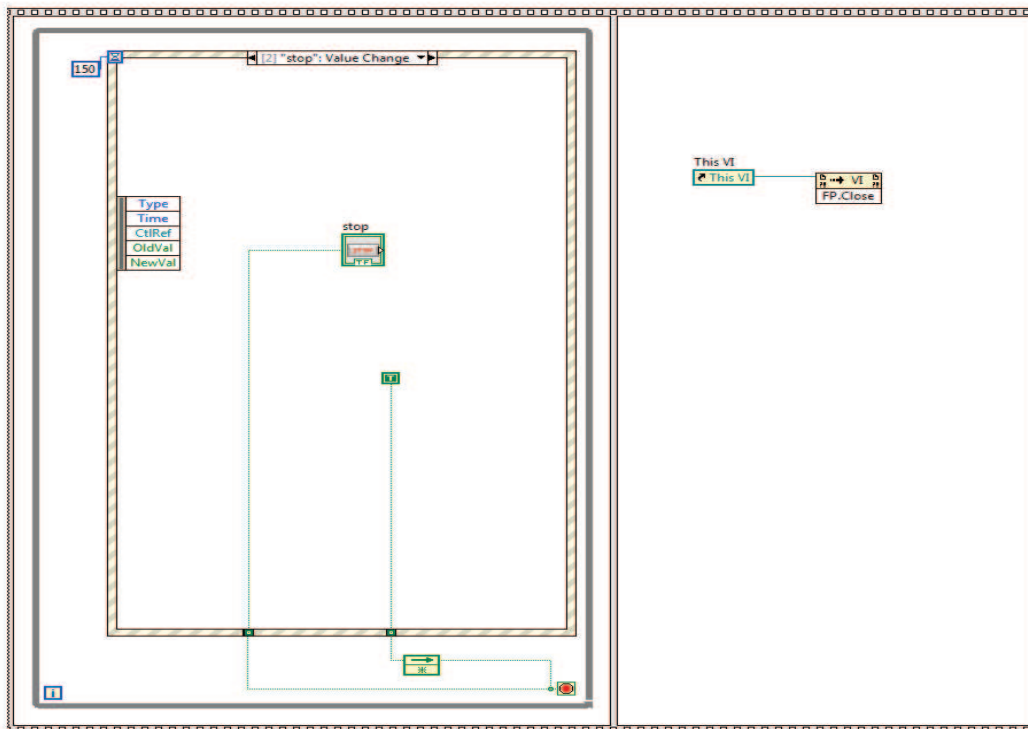
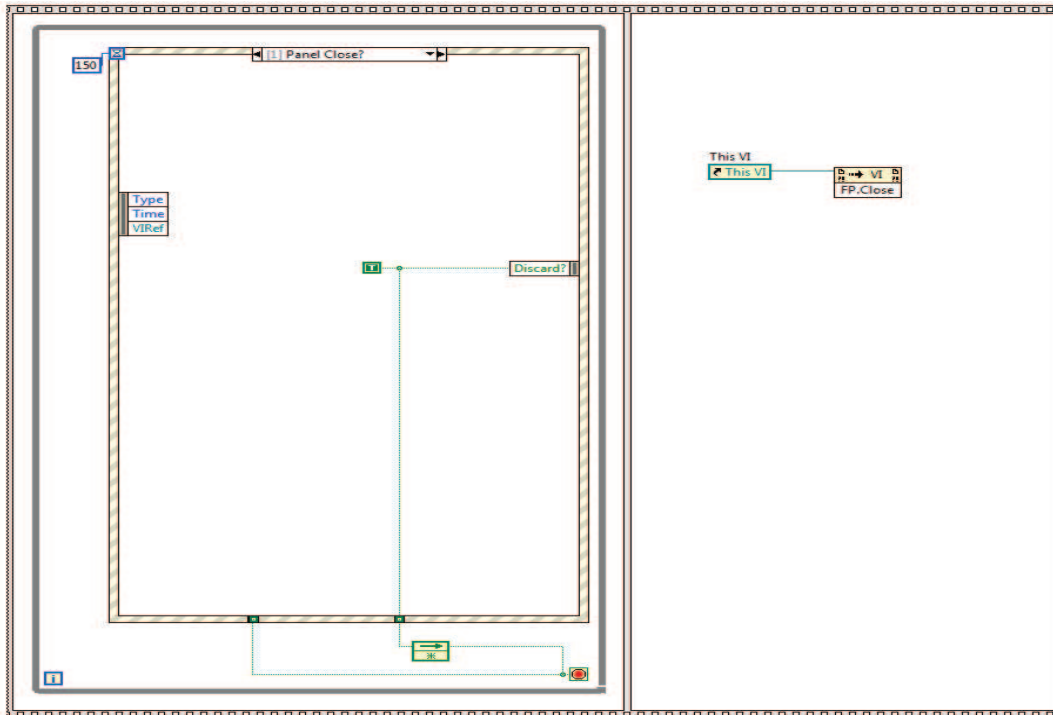
## PROGRAMACIÓN LABVIEW:

Imagen ventana de Inicio, al ejecutar el programa,



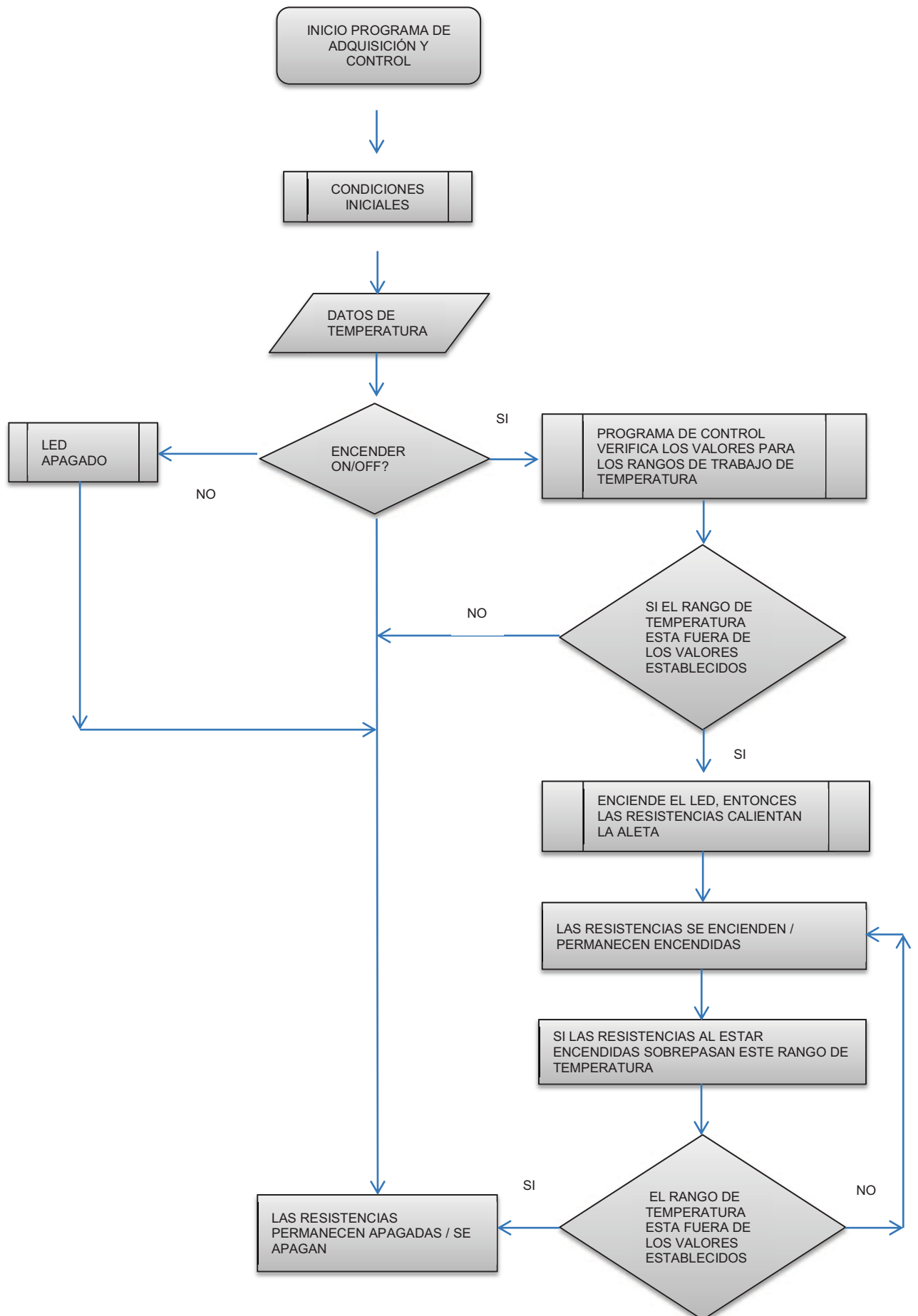
Programación ventana block panel



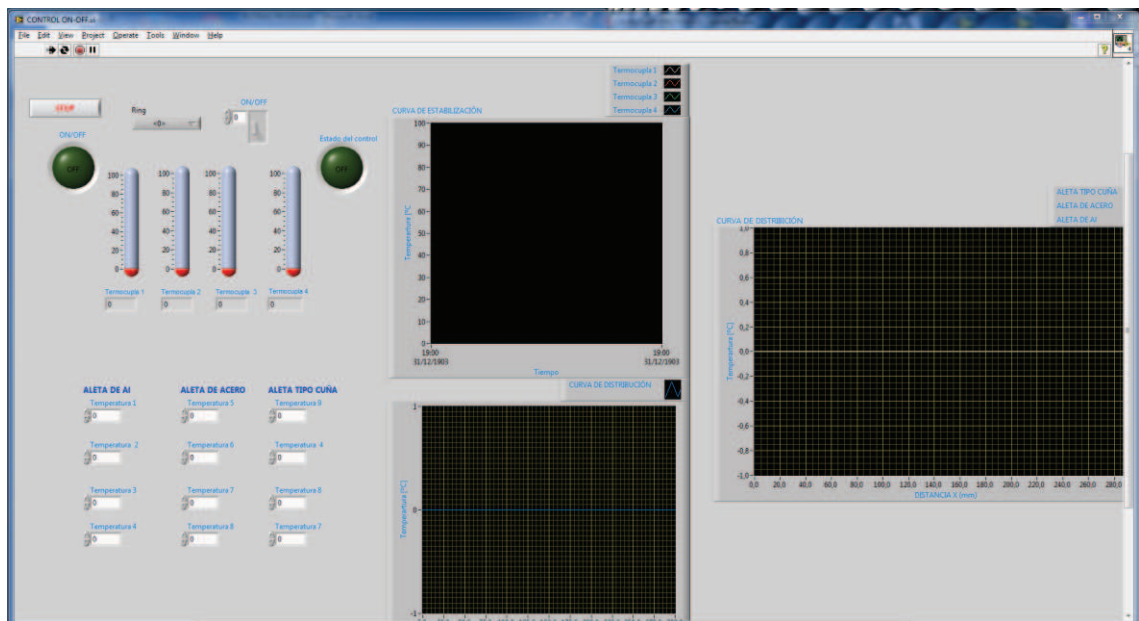




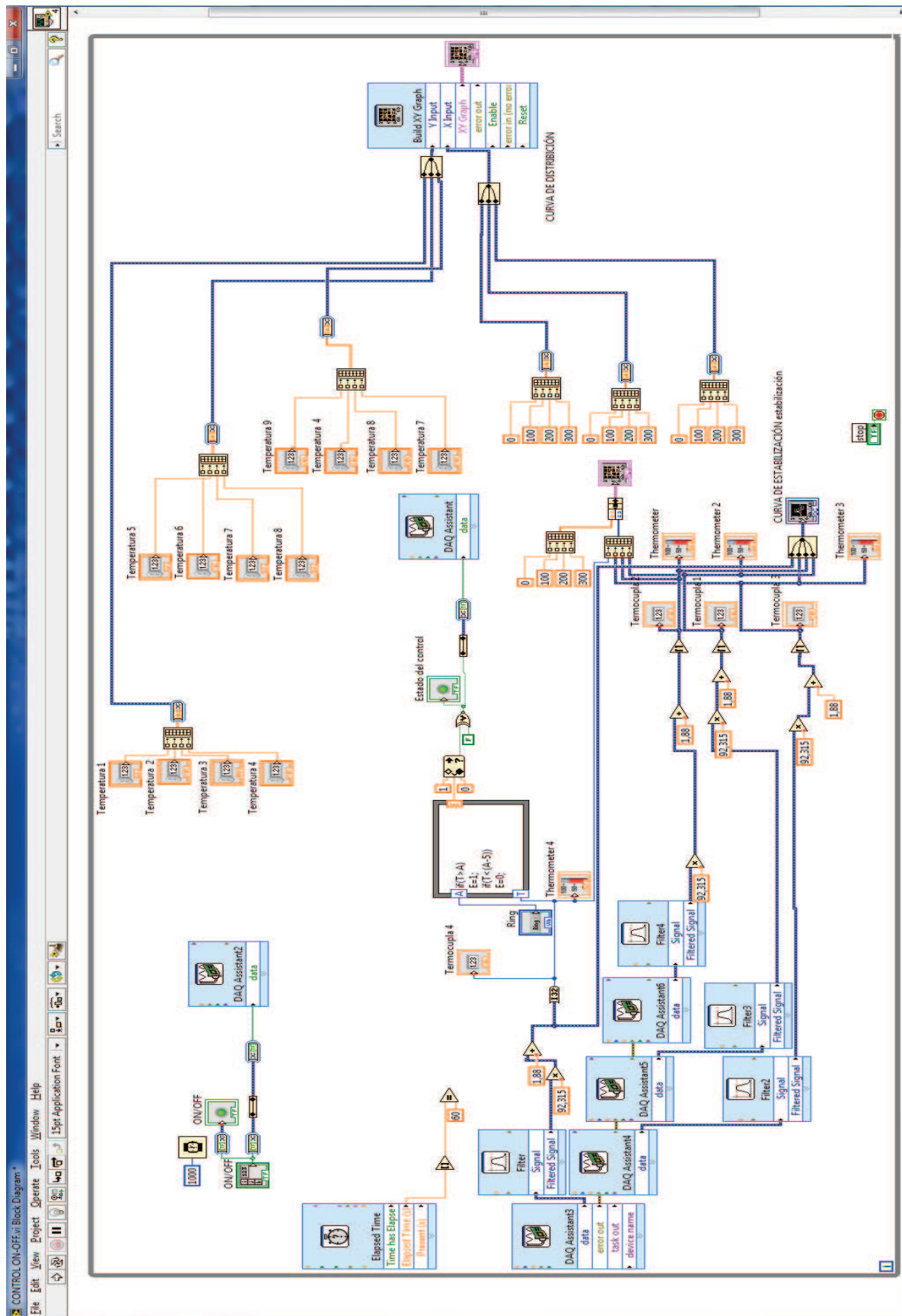
## ABRE EI SUB-PROGRAM-ADQUIRIR DATOS

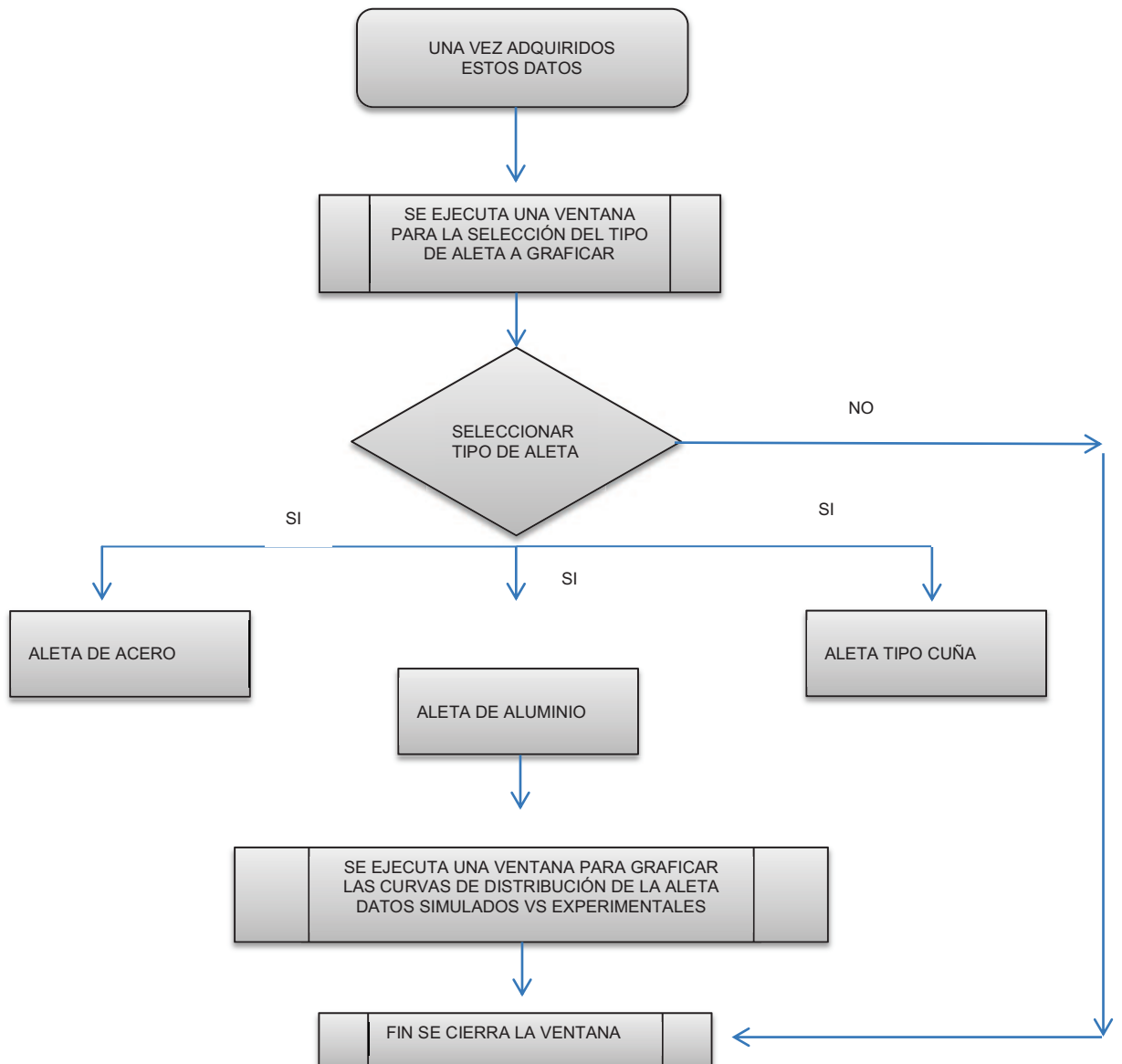


## FRON PANEL

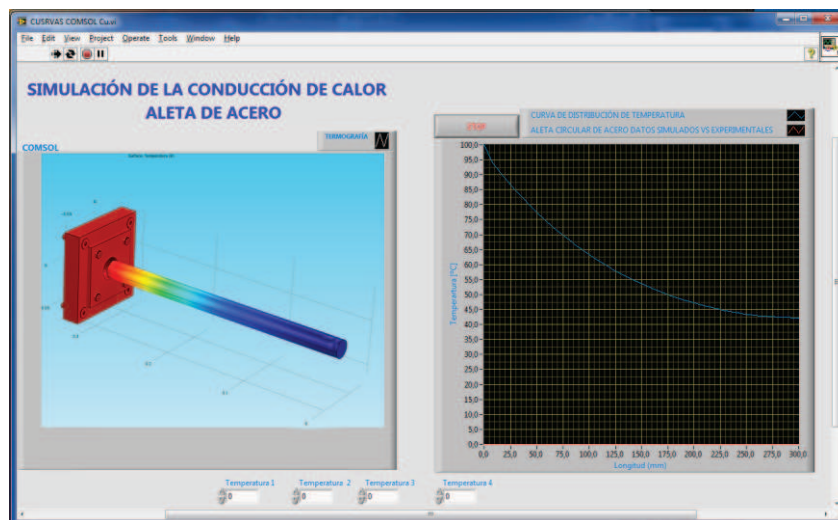
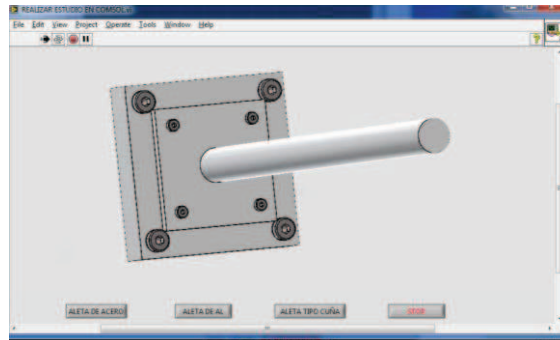


# PROGRAMACIÓN VENTANA BLOCK PANEL

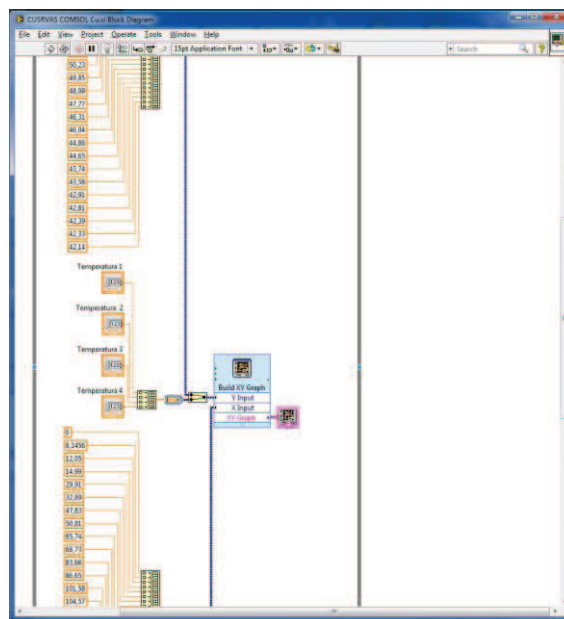


**DATOS SIMULADOS COMSOL VS EXPERIMENTALES**

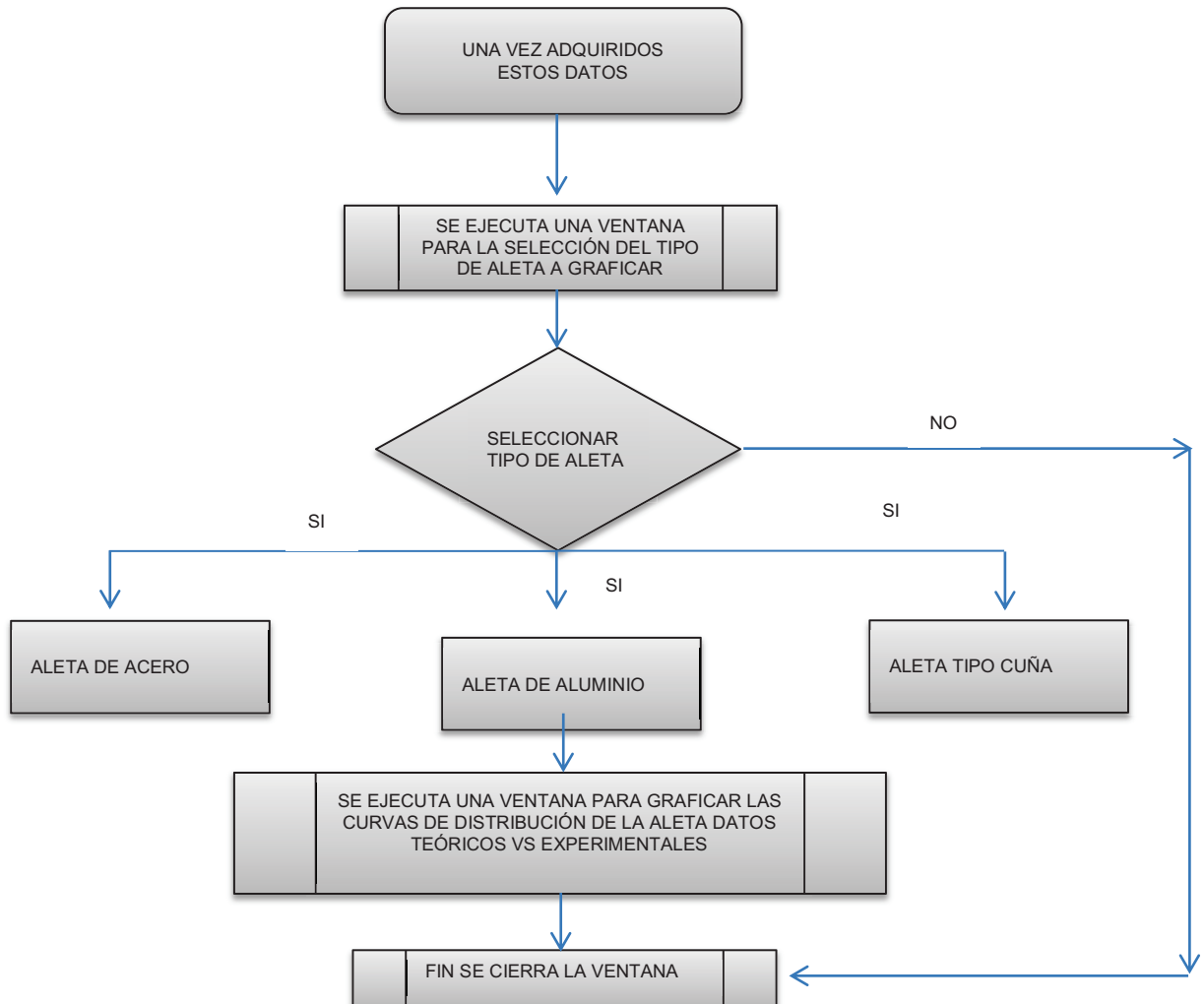
## FRON PANEL



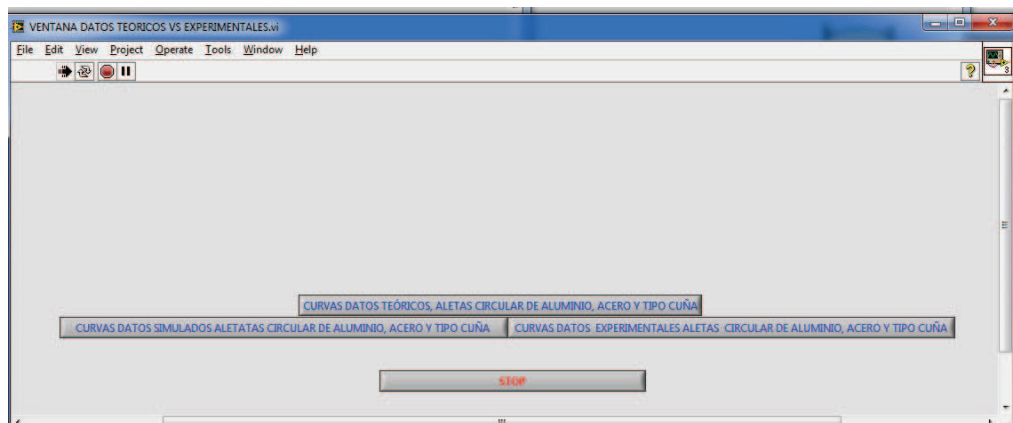
## PROGRAMACIÓN VENTANA BLOCK PAN

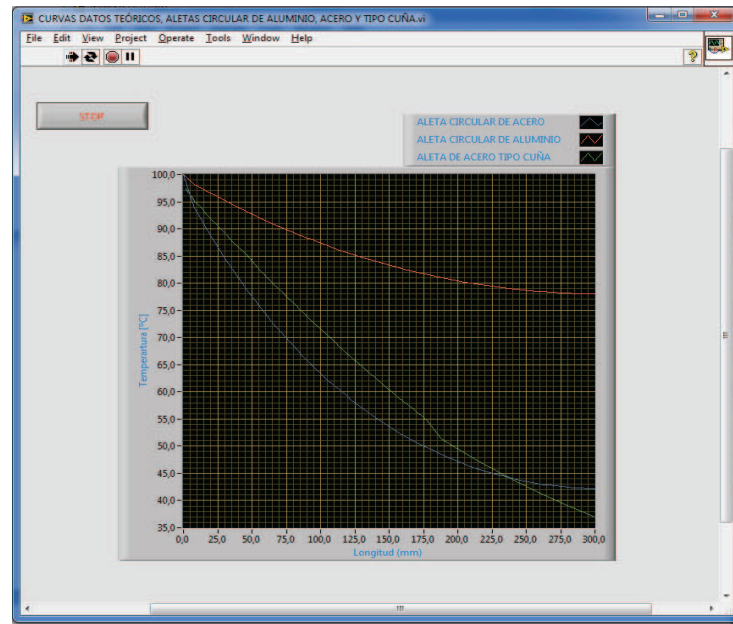


## DATOS TEÓRICOS VS EXPERIMENTALES

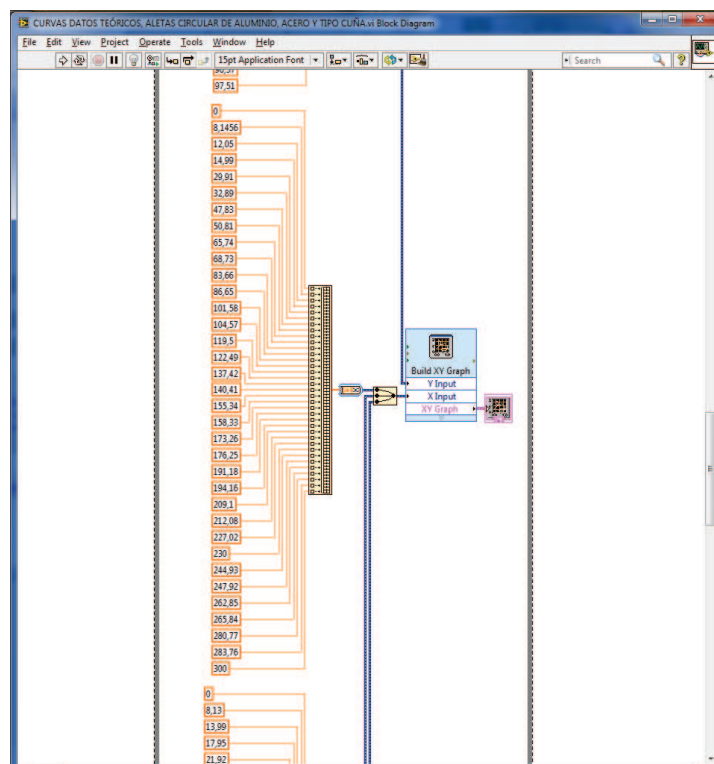


## FRON PANEL

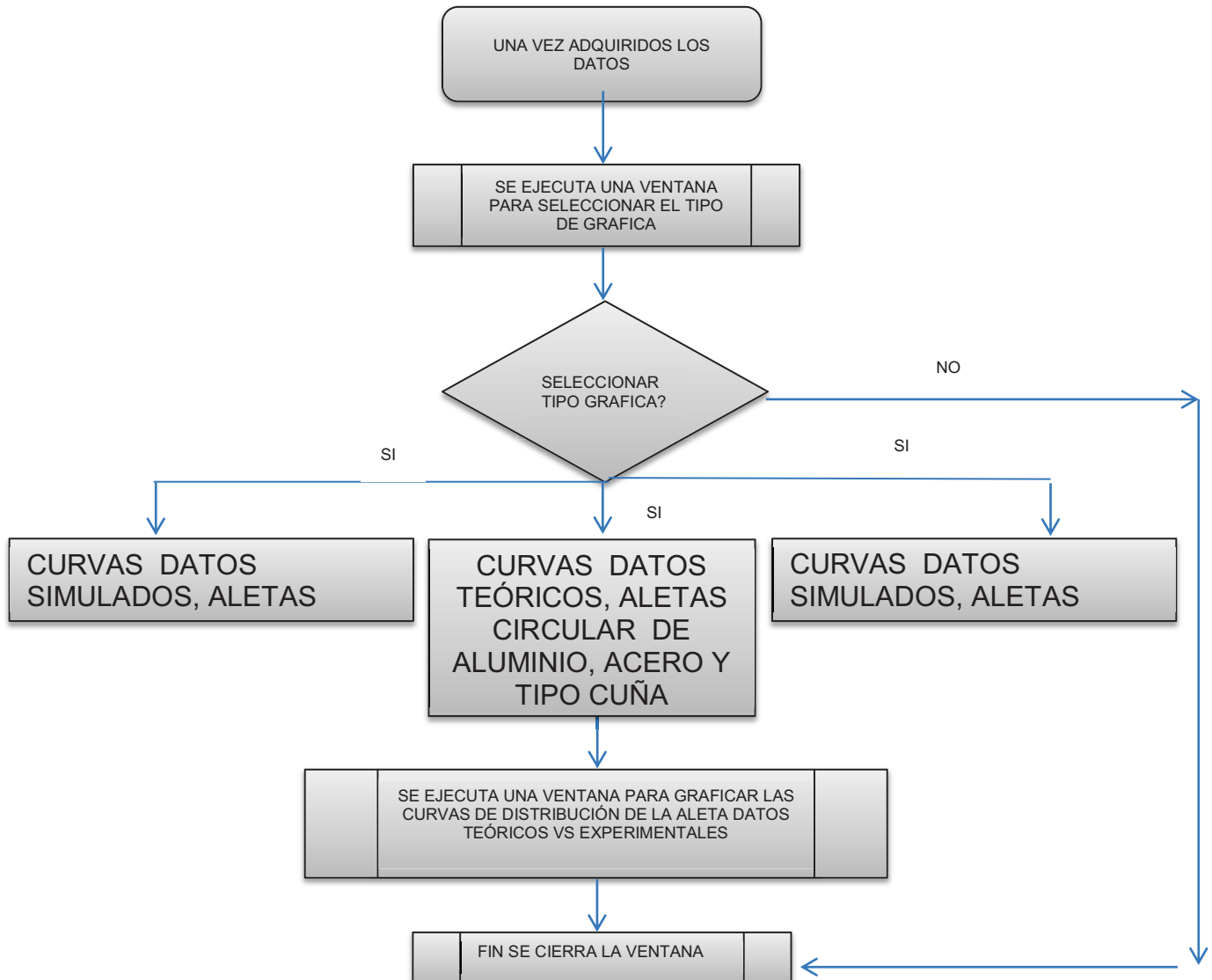




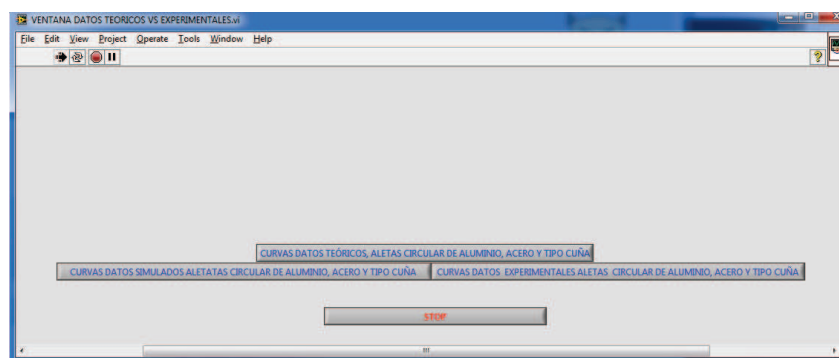
## PROGRAMACIÓN VENTANA BLOCK PANEL



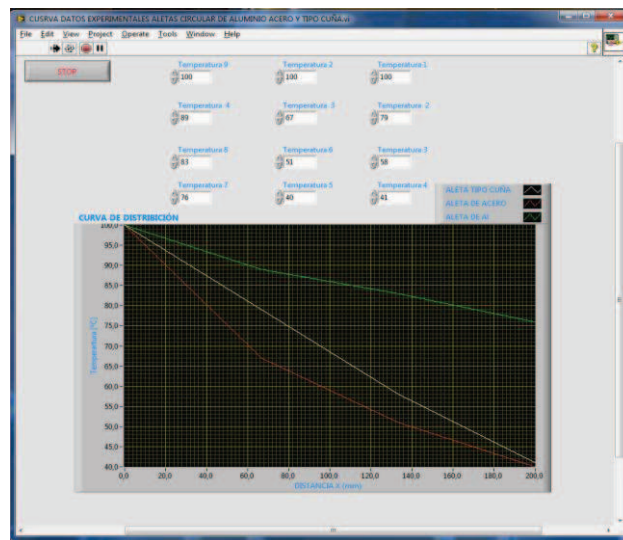
## CURVAS SIMULADAS, TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES



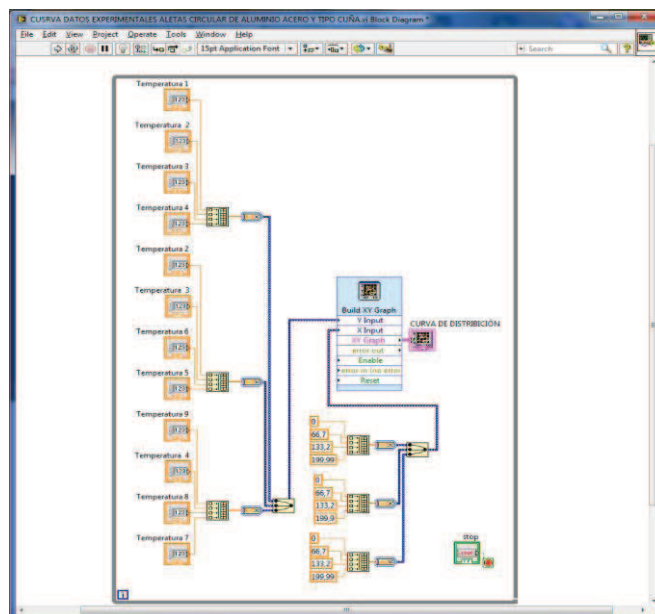
## FRON PANEL







## PROGRAMA VENTANA BLOCK PANEL



## **ANEXO K: PLANOS DEL EQUIPO**

**ANEXO L: ESPECIFICACIONES AD 595**



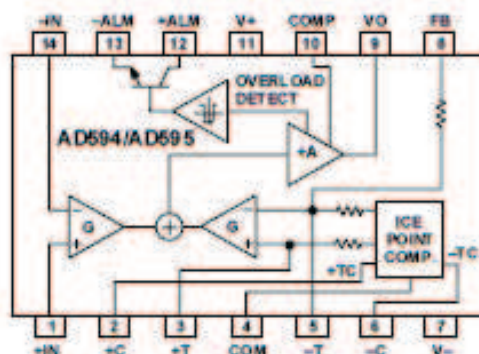
# Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation

## AD594/AD595

### FEATURES

- Pretrimmed for Type J (AD594) or Type K (AD595) Thermocouples
- Can Be Used with Type T Thermocouple Inputs
- Low Impedance Voltage Output: 10 mV/°C
- Built-In Ice Point Compensation
- Wide Power Supply Range: +5 V to ±15 V
- Low Power: <1 mW typical
- Thermocouple Failure Alarm
- Laser Wafer Trimmed to 1°C Calibration Accuracy
- Setpoint Mode Operation
- Self-Contained Celsius Thermometer Operation
- High Impedance Differential Input
- Side-Brazed DIP or Low Cost Cerdip

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



### PRODUCT DESCRIPTION

The AD594/AD595 is a complete instrumentation amplifier and thermocouple cold junction compensator on a monolithic chip. It combines an ice point reference with a precalibrated amplifier to produce a high level (10 mV/°C) output directly from a thermocouple signal. Pin-strapping options allow it to be used as a linear amplifier-compensator or as a switched output setpoint controller using either fixed or remote setpoint control. It can be used to amplify its compensation voltage directly, thereby converting it to a stand-alone Celsius transducer with a low impedance voltage output.

The AD594/AD595 includes a thermocouple failure alarm that indicates if one or both thermocouple leads become open. The alarm output has a flexible format which includes TTL drive capability.

The AD594/AD595 can be powered from a single ended supply (including +5 V) and by including a negative supply, temperatures below 0°C can be measured. To minimize self-heating, an unloaded AD594/AD595 will typically operate with a total supply current 160 µA, but is also capable of delivering in excess of ±5 mA to a load.

The AD594 is precalibrated by laser wafer trimming to match the characteristic of type J (iron-constantan) thermocouples and the AD595 is laser trimmed for type K (chromel-alumel) inputs. The temperature transducer voltages and gain control resistors

are available at the package pins so that the circuit can be recalibrated for the thermocouple types by the addition of two or three resistors. These terminals also allow more precise calibration for both thermocouple and thermometer applications.

The AD594/AD595 is available in two performance grades. The C and the A versions have calibration accuracies of ±1°C and ±3°C, respectively. Both are designed to be used from 0°C to +50°C, and are available in 14-pin, hermetically sealed, side-brazed ceramic DIPs as well as low cost cerdip packages.

### PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD594/AD595 provides cold junction compensation, amplification, and an output buffer in a single IC package.
2. Compensation, zero, and scale factor are all precalibrated by laser wafer trimming (LWT) of each IC die.
3. Flexible pinout provides for operation as a setpoint controller or a stand-alone temperature transducer calibrated in degrees Celsius.
4. Operation at remote application sites is facilitated by low quiescent current and a wide supply voltage range +5 V to dual supplies spanning 30 V.
5. Differential input rejects common-mode noise voltage on the thermocouple leads.

### REV. C

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>  
Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999



# AD594/AD595—SPECIFICATIONS (@ +25°C and $V_S = 5\text{ V}$ , Type J (AD594), Type K (AD595) Thermocouple, unless otherwise noted)

Model	AD594A			AD594C			AD595A			AD595C			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>ABSOLUTE MAXIMUM RATING</b>													
$+V_S$ to $-V_S$			36			36			36			36	Volts
Common-Mode Input Voltage	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	Volts
Differential Input Voltage	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	Volts
<b>Alarm Voltages</b>													
+ALM	$-V_S$		$-V_S + 36$	$-V_S$		$-V_S + 36$	$-V_S$		$-V_S + 36$	$-V_S$		$-V_S + 36$	Volts
-ALM	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	Volts
Operating Temperature Range	-55		+125	-55		+125	-55		+125	-55		+125	°C
Output Short Circuit to Common	Indefinite			Indefinite			Indefinite			Indefinite			
<b>TEMPERATURE MEASUREMENT</b>													
(Specified Temperature Range 0°C to 450°C)													
Calibration Error at +25°C <sup>1</sup>			±3			±1			±3			±1	°C
Stability vs. Temperature <sup>2</sup>			±0.05			±0.025			±0.05			±0.025	°C/°C
Gain Error			±1.5			±0.75			±1.5			±0.75	%
Nominal Transfer Function			10			10			10			10	mV/°C
<b>AMPLIFIER CHARACTERISTICS</b>													
Closed Loop Gain <sup>3</sup>	193.4			193.4			247.3			247.3			
Input Offset Voltage	(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C			μV
Input Bias Current	0.1			0.1			0.1			0.1			μA
Differential Input Range	-10		+50	-10		+50	-10		+50	-10		+50	mV
Common-Mode Range	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	Volts
Common-Mode Sensitivity—RTO	10			10			10			10			mV/V
Power Supply Sensitivity—RTO	10			10			10			10			mV/V
Output Voltage Range													Volts
Dual Supply	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	Volts
Single Supply	0		$+V_S - 2$	0		$-V_S - 2$	0		$+V_S + 2$	0		$+V_S - 2$	Volts
Usable Output Current <sup>4</sup>	±5			±5			±5			±5			mA
3 dB Bandwidth	15			15			15			15			kHz
<b>ALARM CHARACTERISTICS</b>													
$V_{CE(SAT)}$ at 2 mA	0.3			0.3			0.3			0.3			Volts
Leakage Current	±1			±1			±1			±1			μA max
Operating Voltage at -ALM	$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			Volts
Short Circuit Current	20			20			20			20			mA
<b>POWER REQUIREMENTS</b>													
Specified Performance	$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$			Volts
Operating <sup>5</sup>	$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			Volts
Quiescent Current (No Load)													μA
$+V_S$	160		300	160		300	160		300	160		300	μA
$-V_S$	100			100			100			100			μA
<b>PACKAGE OPTION</b>													
TO-116 (D-14)	AD594AD			AD594CD			AD595AD			AD595CD			
CanDip (Q-14)	AD594AQ			AD594CQ			AD595AQ			AD595CQ			

## NOTES

<sup>1</sup> Calibrated for minimum error at +25°C using a thermocouple sensitivity of 51.7 μV/°C. Since a J type thermocouple deviates from this straight line approximation, the AD594 will normally read 3.1 mV when the measuring junction is at 0°C. The AD595 will similarly read 2.7 mV at 0°C.

<sup>2</sup> Defined as the slope of the line connecting the AD594/AD595 errors measured at 0°C and 50°C ambient temperature.

<sup>3</sup> Pin 8 shorted to Pin 9.

<sup>4</sup> Current Sink Capability in single supply configuration is limited to current drawn to ground through a 50 kΩ resistor at output voltages below 2.5 V.

<sup>5</sup>  $-V_S$  must not exceed -16.5 V.

Specifications shown in **boldface** are tested on all production units at final electrical test. Results from these tests are used to calculate outgoing quality levels. All min and max specifications are guaranteed, although only those shown in **boldface** are tested on all production units.

Specifications subject to change without notice.

## INTERPRETING AD594/AD595 OUTPUT VOLTAGES

To achieve a temperature proportional output of 10 mV/°C and accurately compensate for the reference junction over the rated operating range of the circuit, the AD594/AD595 is gain trimmed to match the transfer characteristic of J and K type thermocouples at 25°C. For a type J output in this temperature range the TC is 51.70 μV/°C, while for a type K it is 40.44 μV/°C. The resulting gain for the AD594 is 193.4 (10 mV/°C divided by 51.7 μV/°C) and for the AD595 is 247.3 (10 mV/°C divided by 40.44 μV/°C). In addition, an absolute accuracy trim induces an input offset to the output amplifier characteristic of 16 μV for the AD594 and 11 μV for the AD595. This offset arises because the AD594/AD595 is trimmed for a 250 mV output while applying a 25°C thermocouple input.

Because a thermocouple output voltage is nonlinear with respect to temperature, and the AD594/AD595 linearly amplifies the

compensated signal, the following transfer functions should be used to determine the actual output voltages:

$$AD594 \text{ output} = (\text{Type J Voltage} + 16 \mu\text{V}) \times 193.4$$

$$AD595 \text{ output} = (\text{Type K Voltage} + 11 \mu\text{V}) \times 247.3 \text{ or conversely:}$$

$$\text{Type J voltage} = (AD594 \text{ output}/193.4) - 16 \mu\text{V}$$

$$\text{Type K voltage} = (AD595 \text{ output}/247.3) - 11 \mu\text{V}$$

Table I lists the ideal AD594/AD595 output voltages as a function of Celsius temperature for type J and K ANSI standard thermocouples, with the package and reference junction at 25°C. As is normally the case, these outputs are subject to calibration, gain and temperature sensitivity errors. Output values for intermediate temperatures can be interpolated, or calculated using the output equations and ANSI thermocouple voltage tables referred to zero degrees Celsius. Due to a slight variation in alloy content between ANSI type J and DIN FE-CUNI



## AD594/AD595

Table I. Output Voltage vs. Thermocouple Temperature (Ambient +25°C,  $V_S = -5\text{ V}, +15\text{ V}$ )

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
-200	-7.890	-1523	-5.891	-1454
-180	-7.402	-1428	-5.550	-1370
-160	-6.821	-1316	-5.141	-1269
-140	-6.159	-1188	-4.669	-1152
-120	-5.426	-1046	-4.138	-1021
-100	-4.632	-893	-3.553	-876
-80	-3.785	-729	-2.920	-719
-60	-2.892	-556	-2.243	-552
-40	-1.960	-376	-1.527	-375
-20	-995	-189	-777	-189
-10	-501	-94	-392	-94
0	0	3.1	0	2.7
10	.507	101	.397	101
20	1.019	200	.798	200
25	1.277	250	1.000	250
30	1.536	300	1.203	300
40	2.058	401	1.611	401
50	2.585	503	2.022	503
60	3.115	606	2.436	605
80	4.186	813	3.266	810
100	5.268	1022	4.095	1015
120	6.359	1233	4.919	1219
140	7.457	1445	5.733	1420
160	8.560	1659	6.539	1620
180	9.667	1873	7.338	1817
200	10.777	2087	8.137	2015
220	11.887	2302	8.938	2213
240	12.998	2517	9.745	2413
260	14.108	2732	10.560	2614
280	15.217	2946	11.381	2817
300	16.325	3160	12.207	3022
320	17.432	3374	13.039	3227
340	18.537	3588	13.874	3434
360	19.640	3801	14.712	3641
380	20.743	4015	15.552	3849
400	21.846	4228	16.395	4057
420	22.949	4441	17.241	4266
440	24.054	4655	18.088	4476
460	25.161	4869	18.938	4686
480	26.272	5084	19.788	4896
500	27.388	5300	20.640	5107
520	28.511	5517	21.493	5318
540	29.642	5736	22.346	5529
560	30.782	5956	23.198	5740
580	31.933	6179	24.050	5950
600	33.096	6404	24.902	6161
620	34.273	6632	25.751	6371
640	35.464	6862	26.599	6581
660	36.671	7095	27.445	6790
680	37.893	7332	28.288	6998
700	39.130	7571	29.128	7206
720	40.382	7813	29.965	7413
740	41.647	8058	30.799	7619
750	42.283	8181	31.214	7722
760	-	-	31.629	7825
780	-	-	32.455	8029
800	-	-	33.277	8232
820	-	-	34.095	8434
840	-	-	34.908	8636
860	-	-	35.718	8836
880	-	-	36.524	9035
900	-	-	37.325	9233
920	-	-	38.122	9430
940	-	-	38.915	9626
960	-	-	39.703	9821
980	-	-	40.488	10015
1000	-	-	41.269	10209
1020	-	-	42.045	10400
1040	-	-	42.817	10591
1060	-	-	43.585	10781
1080	-	-	44.349	10970
1100	-	-	45.108	11158
1120	-	-	45.863	11345
1140	-	-	46.612	11530
1160	-	-	47.356	11714
1180	-	-	48.095	11897
1200	-	-	48.828	12078
1220	-	-	49.555	12258
1240	-	-	50.276	12436
1250	-	-	50.633	12524

thermocouples Table I should not be used in conjunction with European standard thermocouples. Instead the transfer function given previously and a DIN thermocouple table should be used. ANSI type K and DIN NiCr-Ni thermocouples are composed

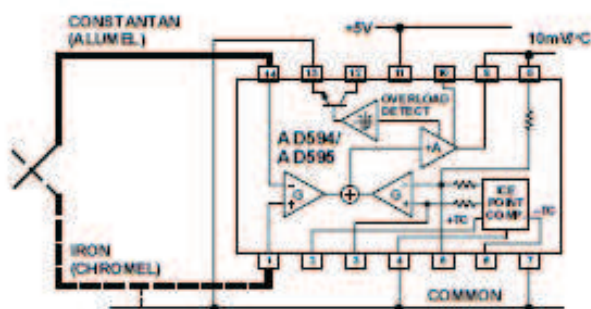


Figure 1. Basic Connection, Single Supply Operation of identical alloys and exhibit similar behavior. The upper temperature limits in Table I are those recommended for type J and type K thermocouples by the majority of vendors.

#### SINGLE AND DUAL SUPPLY CONNECTIONS

The AD594/AD595 is a completely self-contained thermocouple conditioner. Using a single +5 V supply the interconnections shown in Figure 1 will provide a direct output from a type J thermocouple (AD594) or type K thermocouple (AD595) measuring from 0°C to +300°C.

Any convenient supply voltage from +5 V to +30 V may be used, with self-heating errors being minimized at lower supply levels. In the single supply configuration the +5 V supply connects to Pin 11 with the V- connection at Pin 7 strapped to power and signal common at Pin 4. The thermocouple wire inputs connect to Pins 1 and 14 either directly from the measuring point or through intervening connections of similar thermocouple wire type. When the alarm output at Pin 13 is not used it should be connected to common or -V. The precalibrated feedback network at Pin 8 is tied to the output at Pin 9 to provide a 10 mV/°C nominal temperature transfer characteristic.

By using a wider ranging dual supply, as shown in Figure 2, the AD594/AD595 can be interfaced to thermocouples measuring both negative and extended positive temperatures:



## AD594/AD595

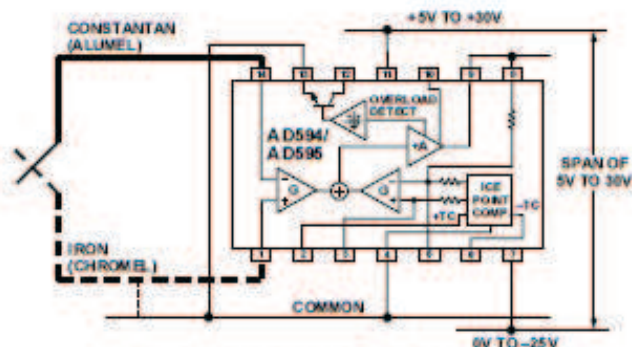


Figure 2. Dual Supply Operation

With a negative supply the output can indicate negative temperatures and drive grounded loads or loads returned to positive voltages. Increasing the positive supply from 5 V to 15 V extends the output voltage range well beyond the 750°C temperature limit recommended for type J thermocouples (AD594) and the 1250°C for type K thermocouples (AD595).

Common-mode voltages on the thermocouple inputs must remain within the common-mode range of the AD594/AD595, with a return path provided for the bias currents. If the thermocouple is not remotely grounded, then the dotted line connections in Figures 1 and 2 are recommended. A resistor may be needed in this connection to assure that common-mode voltages induced in the thermocouple loop are not converted to normal mode.

### THERMOCOUPLE CONNECTIONS

The isothermal terminating connections of a pair of thermocouple wires forms an effective reference junction. This junction must be kept at the same temperature as the AD594/AD595 for the internal cold junction compensation to be effective.

A method that provides for thermal equilibrium is the printed circuit board connection layout illustrated in Figure 3.

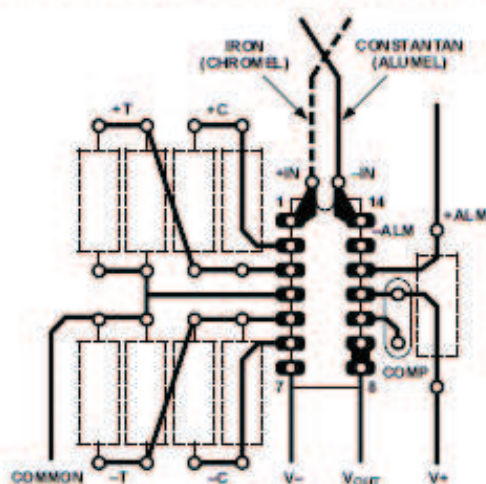


Figure 3. PCB Connections

Here the AD594/AD595 package temperature and circuit board are thermally contacted in the copper printed circuit board tracks under Pins 1 and 14. The reference junction is now composed of a copper-constantan (or copper-alumel) connection and copper-iron (or copper-chromel) connection, both of which are at the same temperature as the AD594/AD595.

The printed circuit board layout shown also provides for placement of optional alarm load resistors, recalibration resistors and a compensation capacitor to limit bandwidth.

To ensure secure bonding the thermocouple wire should be cleaned to remove oxidation prior to soldering. Noncorrosive rosin flux is effective with iron, constantan, chromel and alumel and the following solders: 95% tin-5% antimony, 95% tin-5% silver or 90% tin-10% lead.

### FUNCTIONAL DESCRIPTION

The AD594 behaves like two differential amplifiers. The outputs are summed and used to control a high gain amplifier, as shown in Figure 4.

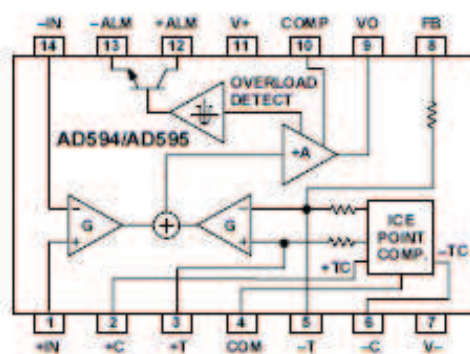


Figure 4. AD594/AD595 Block Diagram

In normal operation the main amplifier output, at Pin 9, is connected to the feedback network, at Pin 8. Thermocouple signals applied to the floating input stage, at Pins 1 and 14, are amplified by gain  $G$  of the differential amplifier and are then further amplified by gain  $A$  in the main amplifier. The output of the main amplifier is fed back to a second differential stage in an inverting connection. The feedback signal is amplified by this stage and is also applied to the main amplifier input through a summing circuit. Because of the inversion, the amplifier causes the feedback to be driven to reduce this difference signal to a small value. The two differential amplifiers are made to match and have identical gains,  $G$ . As a result, the feedback signal that must be applied to the right-hand differential amplifier will precisely match the thermocouple input signal when the difference signal has been reduced to zero. The feedback network is trimmed so that the effective gain to the output, at Pins 8 and 9, results in a voltage of 10 mV/°C of thermocouple excitation.

In addition to the feedback signal, a cold junction compensation voltage is applied to the right-hand differential amplifier. The compensation is a differential voltage proportional to the Celsius temperature of the AD594/AD595. This signal disturbs the differential input so that the amplifier output must adjust to restore the input to equal the applied thermocouple voltage.

The compensation is applied through the gain scaling resistors so that its effect on the main output is also 10 mV/°C. As a result, the compensation voltage adds to the effect of the thermocouple voltage a signal directly proportional to the difference between 0°C and the AD594/AD595 temperature. If the thermocouple reference junction is maintained at the AD594/AD595 temperature, the output of the AD594/AD595 will correspond to the reading that would have been obtained from amplification of a signal from a thermocouple referenced to an ice bath.



# AD594/AD595

## THERMOCOUPLE BASICS

Thermocouples are economical and rugged; they have reasonably good long-term stability. Because of their small size, they respond quickly and are good choices where fast response is important. They function over temperature ranges from cryogenics to jet-engine exhaust and have reasonable linearity and accuracy.

Because the number of free electrons in a piece of metal depends on both temperature and composition of the metal, two pieces of dissimilar metal in isothermal and contact will exhibit a potential difference that is a repeatable function of temperature, as shown in Figure 14. The resulting voltage depends on the temperatures, T1 and T2, in a repeatable way.

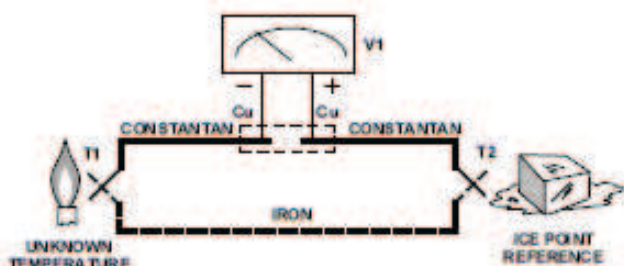


Figure 14. Thermocouple Voltage with 0°C Reference

Since the thermocouple is basically a differential rather than absolute measuring device, a known reference temperature is required for one of the junctions if the temperature of the other is to be inferred from the output voltage. Thermocouples made of specially selected materials have been exhaustively characterized in terms of voltage versus temperature compared to primary temperature standards. Most notably the water-ice point of 0°C is used for tables of standard thermocouple performance.

An alternative measurement technique, illustrated in Figure 15, is used in most practical applications where accuracy requirements do not warrant maintenance of primary standards. The reference junction temperature is allowed to change with the environment of the measurement system, but it is carefully measured by some type of absolute thermometer. A measurement of the thermocouple voltage combined with a knowledge of the reference temperature can be used to calculate the measurement junction temperature. Usual practice, however, is to use a convenient thermoelectric method to measure the reference temperature

and to arrange its output voltage so that it corresponds to a thermocouple referred to 0°C. This voltage is simply added to the thermocouple voltage and the sum then corresponds to the standard voltage tabulated for an ice-point referenced thermocouple.

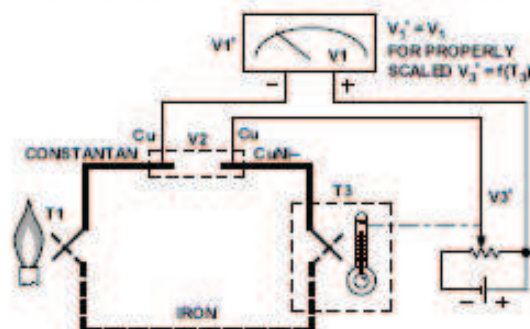


Figure 15. Substitution of Measured Reference Temperature for Ice Point Reference

The temperature sensitivity of silicon integrated circuit transistors is quite predictable and repeatable. This sensitivity is exploited in the AD594/AD595 to produce a temperature related voltage to compensate the reference of "cold" junction of a thermocouple as shown in Figure 16.

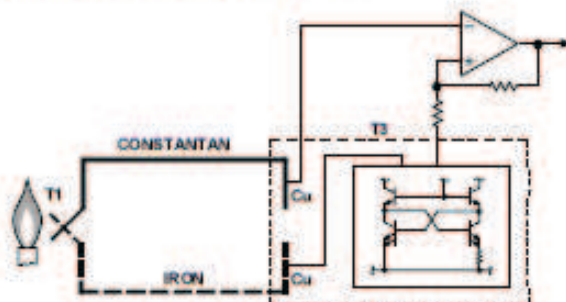


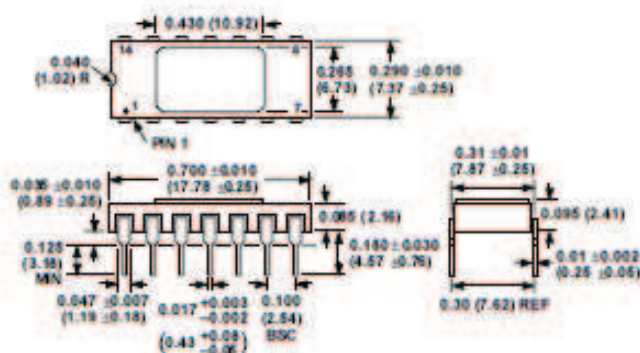
Figure 16. Connecting Isothermal Junctions

Since the compensation is at the reference junction temperature, it is often convenient to form the reference "junction" by connecting directly to the circuit wiring. So long as these connections and the compensation are at the same temperature no error will result.

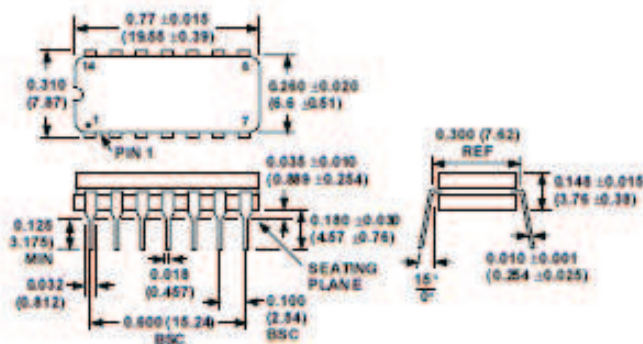
## OUTLINE DIMENSIONS

Dimensions shown in inches and (mm).

### TO-116 (D) Package



### Cerdip (Q) Package





## **ANEXO M: GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO**

## GUÍA DE PRÁCTICAS DEL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

I. **TEMA:** Superficies extendidas en estado estable

### II. OBJETIVOS

#### 1.1 OBJETIVO GENERAL:

Evaluar las características termo físicas de diferentes superficies extendidas.

#### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Obtener las curvas de distribución de temperatura experimentales para diferentes tipos de aletas.
- Evaluar los datos experimentales con los datos obtenidos por el método de elementos finitos y los datos teóricos.
- Determinar el coeficiente de convección global para el equipo
- Determinar la eficiencia de cada una de las superficies extendidas

### III. MARCO TEÓRICO:

#### Superficie extendida

Una superficie extendida es aquella que aumenta la transferencia de energía entre una superficie y un fluido adyacente, este fenómeno se logra a través del aumento del área superficial que hace contacto con el fluido.

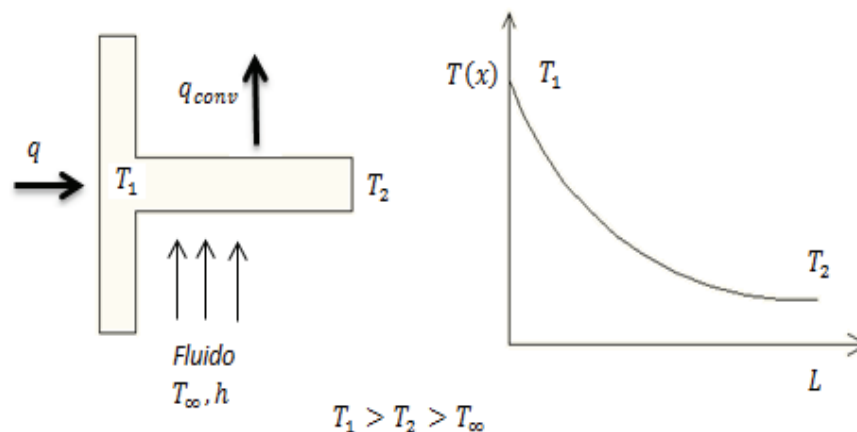


Fig. N° 1

Las aletas se agregan para aumentar el producto  $h_{conv}A$  y así disminuir la resistencia térmica por convección  $1/h_{conv}A$ .

## Aplicaciones

Las superficies extendidas tienen aplicaciones tan diversas como:

- Cilindros en motores de motocicletas y podadoras
- En procesos químicos de refrigeración, y criogénicos
- En aparatos eléctricos y electrónicos
- Turbinas de gas
- En disipadores de calor para procesos residuales de calderas
- Intercambiadores de calor
- Módulos de combustible nuclear
- En hornos para tratamientos térmicos

## Tipos

Las superficies extendidas varían según su peso, geometría, y ecuaciones resultantes, los arreglos superficiales más comunes son:

- Longitudinales
- Radiales o transversales
- Espinas

## IV. COMPONENTES DEL EQUIPO:

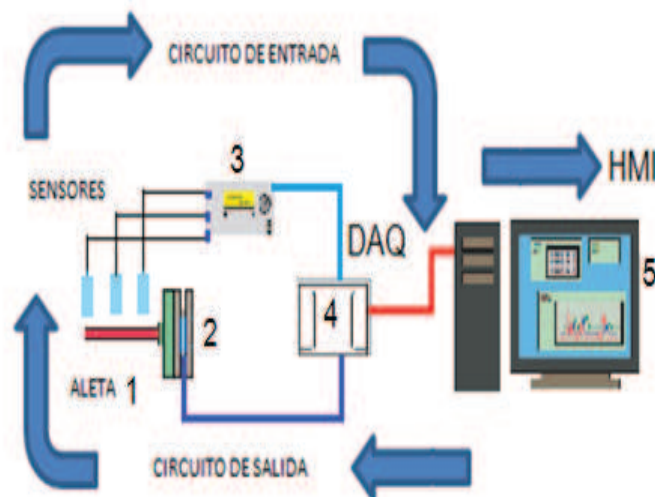


Fig. N° 2

1. Superficie extendida
2. Generador de Calor
3. Circuito de acoplamiento de la señal

4. DAQ tarjeta de adquisición de datos
5. Programa en LabView (HMI)

## V. PROCEDIMIENTO

1. Tomar la aleta y empaparla de aceite entre la parte de la placa fuente de calor y la base de la aleta
2. Asegurar la aleta a la placa fuente de calor
3. Colocar las termocuplas en los orificios de medición
4. Encender el ordenador que está destinado para el equipo
5. Ejecutar el programa de adquisición y de control
6. Conectar el puerto USB del DAQ 6009 al ordenador
7. Seleccionar la temperatura de control
8. Verificar que los comandos de encendido y apagado funcionen dentro del programa de LabView
9. Encender la fuente de alimentación total del equipo
10. Esperar a que las temperaturas se estabilicen
11. Registrar datos de temperatura
12. Examinar y graficar los datos
13. Apagar los comandos de temperatura y control
14. Sacar la aleta con guantes que soporten altas temperaturas
15. Colocar la siguiente aleta y esperar alrededor de tres minutos y encender de nuevo los controles del programa

## VI. CALCULOS

### Calculo del coeficiente de convección experimental

Se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- La temperatura base de la aleta que es de  $100^{\circ}\text{C}$ , esta temperatura es igual en toda la superficie de las aletas.
- El valor de las propiedades del aire se hacen a temperatura promedio que resulta de hacer un promedio de la temperatura bases con la temperatura  $T_{\infty}$ .
- El coeficiente de convección resultante de la aleta de sección circular constante de aluminio será igual para todas las aletas.

- La  $L_c$  es igual al  $D$  de la aleta de sección circular constante.

$$h_l = \frac{Nu * k}{L_c} \quad (1-1)$$

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2, \quad Ra_D \leq 10^{12} \quad (1-2)$$

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (1-3)$$

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s + T_{alr})(T_s^4 + T_{alr}^4) \quad (1-4)$$

$$h = h_r + h_l \quad (1-5)$$

### Calculo de la distribución de temperatura y eficiencia para la aleta de sección circular constante

Condición: Adiabática:  $\frac{d\theta}{dx}\Big|_{x=L} = 0$

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL} \quad (1-6)$$

$$q_f = M \tanh mL \quad (1-7)$$

$$\theta = T - T_\infty; \quad \theta_b = \theta(0) = T_b - T_\infty; \quad m^2 = \frac{hP}{kA_c}; \quad M = \sqrt{hPkA_c}\theta_b$$

Eficiencia de la aleta

$$n_f = \frac{q_f}{q_{Máx}} = \frac{q_f}{h A_f \theta_b} \quad (1-8)$$

**Calculo de la distribución de temperatura y eficiencia para la aleta triangular.**

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{I_0(2m\sqrt{bx})}{I_0(2mb)} \quad (1-9)$$

$$q_f = km\delta_b L \theta_b \frac{I_1 2mb}{I_0(2mb)} \quad (1-10)$$

$$m = \sqrt{\frac{2h}{k\delta_b}}$$

La eficiencia se la calcula con la ecuación (1-8)

## VII. NOMENCLATURA

$T_{atr}$  = Temperatura temperatura de los alrededores [K].

$R_{aD}$  = Numero de Rayleigh

$Nu$  = Número promedio de Nusselt para un cilindro horizontal

$Pr$  = Numero de Prandtl

$T_s$  = Temperatura de la superficie [K].

$g$  = Aceleracion Gravitacional,  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$\beta$  = Coeficiente de expansión volumétrica,  $\left[\frac{1}{K}\right]$

$\nu$  = Viscosidad cinemática,  $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

$\sigma$  = Es la constante de Stefan-Boltzmann,  $5.67 * 10^{-8} \left[\frac{w}{m^2 k^4}\right]$

$\varepsilon$  = Emisividad

$L$  = Longitud de la aleta circular, [m]

$k$  = Conductividad térmica del aire,  $\left[\frac{w}{m*k}\right]$

$b$  = Longitud de la aleta de sección transversal variable, [m]

$\frac{\theta}{\theta_b}$  = Distribución de temperatura

$q_f$  = Transferencia de calor, [w]

$h_l$  = Conveccion libre,  $\left[\frac{w}{m^2*k}\right]$

$h_r$  = Coeficiente de convección por radiación,  $\left[\frac{w}{m^2k}\right]$

$n_f$  = Eficiencia de la aleta

$A_f$  = Area de la superficie de la aleta,  $[m^2]$

$\theta_b$  = Diferencia de temperatura entre la base y el fluido,  $[^\circ C]$

$T_\infty$  = Temperatura media del fluido,  $[^\circ C]$

$L_c$  = Longitud característica de la aleta de sección circular constante,  $[m]$

### VIII. INFORME:

1. Marco teórico (máximo 3 hojas).
2. Elaborar cuadro de datos.
3. Calcular: coeficiente global de convección, distribución de temperatura, transferencia de calor y eficiencia de las aletas.
4. En un software basado en elementos finitos obtener las curvas de distribución de temperatura para las diferentes aletas.
5. Comparar los datos simulados y teóricos con los datos experimentales.
6. Elabora las curvas de distribución de temperatura simulada, teórica y experimental.
7. Análisis de resultados.
8. Conclusiones y recomendaciones (individuales).
9. Bibliografía.

**NOTA:** Hacer un reconocimiento del equipo antes de realizar la práctica.