

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA EL ESTUDIO  
DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN SUPERFICIES EXTENDIDAS.**

**DANNY LIBARDO LEÓN GOMEZ.  
CARLOS ALFREDO MORENO SILVA.**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
BUCARAMANGA**

**2013**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA EL ESTUDIO  
DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN SUPERFICIES EXTENDIDAS.**

**DANNY LIBARDO LEÓN GOMEZ.  
CARLOS ALFREDO MORENO SILVA.**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de  
INGENIERO MECÁNICO**

**DIRECTOR  
PHD. DAVID ALFREDO FUENTES DÍAZ**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
BUCARAMANGA**

**2013**

## **DEDICATORIA**

**A Dios por darme la vida y la posibilidad de lograr cada una de mis metas,  
junto a todos aquellos que me brindan su amor y felicidad.**

**A mis padres Libardo y Olga, por su apoyo incondicional en momentos  
difíciles, durante esta travesía, y por su gran amor que me llevan día a día a  
ser una mejor persona.**

**A mi novia Marcela, por estar a mi lado en cada momento de este camino,  
brindándome fuerzas, su amor y grandes consejos para seguir adelante.**

**A mis abuelos maternos Jesús y Argemira por su gran amor que me brindan,  
y mis abuelos paternos Eliseo y Zoila que en la paz de dios le dedico este  
gran triunfo en mi vida.**

**A todos mis familiares, hermanas y sobrinos, gracias por estar en cada  
momento difícil y brindar apoyo a mi vida.**

**A mis amigos por los grandes momentos de alegría y estudio vivido en este  
ciclo que termina.**

**Danny Libardo León Gomez**

**A Dios sobre todo por darme la oportunidad de vivir, protegerme y acompañarme durante esta etapa de formación profesional en la Universidad Industrial de Santander y permitirme cumplir esta meta.**

**A mi Papá Carlos Josué a mi mamá Azucena por regalarme el don de la vida, guiarme y cuidarme en los momentos más difíciles de esta, siendo ejemplo de coraje, tenacidad y fortaleza.**

**A mi hermana Sandra Ximena por ser ejemplo a seguir por su dedicación, esmero y disciplina, siempre ayudándome con sus consejos y con el estudio.**

**A Mónica Cristina y Angélica del Pilar que llegaron a mi vida para hacerla más feliz, me llenaron de confianza y me dieron el aliento necesario para alcanzar esta meta tan esperada por todos.**

**A mis amig@s que alegran los días con las bobadas que dicen, haciéndome reír y pasar momentos divertidos en las buenas y en las malas.**

**A la Cruz Roja Colombiana y en especial a la Seccional Santander, por permitirme ser parte de ella, permitiéndome así capacitarme en muchas áreas y formarme como mejor persona y profesional.**

**Carlos Moreno**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores del presente trabajo de grado agradecemos sinceramente a:

Dios principalmente por concedernos la posibilidad de ser parte de una gran institución como es la Universidad Industrial de Santander.

La Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Mecánica por brindarnos una formación personal y profesional con la gran calidad.

Ing. David Alfredo Fuentes Díaz, Director del proyecto de grado, por su dedicación, acompañamiento y asesorías dadas durante todo el desarrollo del proyecto.

Amig@s que se encontraron presente durante nuestro pasó por la UIS tanto en los momentos malos como buenos y que de una u otra manera nos apoyaron para facilitarnos y hacernos más llevadero el transcurrir del día a día.

A nuestros familiares, por la gran paciencia, apoyo en todo momento y oraciones realizadas en esta etapa de formación que ya culmina.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	- 18 -
1. GENERALIDADES.....	- 20 -
1.1. TIPOS DE CALOR.....	- 20 -
1.1.1. Calor Sensible.....	- 20 -
1.1.2. Calor Latente.....	- 20 -
1.1.3. Calor de Reacción.....	- 21 -
1.2. TRANSFERENCIA DE CALOR.....	- 22 -
1.3. TRANSFERENCIA DE CALOR EN SUPERFICIES EXTENDIDAS.....	- 25 -
1.3.1. Tipos de Aletas.....	- 26 -
1.3.2. Ecuación Diferencial y Condiciones de Contorno.....	- 27 -
1.3.2.1. Sección Transversal Uniforme:.....	- 28 -
1.3.2.2. Sección Transversal Variable.....	- 31 -
1.3.3. Eficiencia Global De Una Aleta.....	- 32 -
1.3.4. Eficiencia De Superficies Aleteadas.....	- 34 -
1.3.5. Longitud Óptima de una Aleta.....	- 36 -
2. DESCRIPCION Y SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL BANCO DE PRUEBAS.....	- 37 -
2.1. ALETAS DE PRUEBA.....	- 38 -
2.1.1. Aletas Longitudinales.....	- 39 -
2.1.2. Aletas Anulares.....	- 40 -
2.1.3. Aletas de Agujas.....	- 41 -
2.2. SISTEMA GENERADOR DE CALOR.....	- 42 -
2.2.1. Resistencia Eléctrica.....	- 42 -
2.3. SISTEMA ELECTRICO.....	- 44 -
2.4. ELEMENTOS DE MEDICION CENSADO Y CONTROL.....	- 45 -

2.4.1. Termómetros Digitales .....	- 45 -
2.4.2. Relé de Estado Sólido (SSR) .....	- 47 -
2.4.3. Control de Temperatura (Pirometro PID) .....	- 48 -
2.4.3.1. Funciones Esenciales Y Rendimiento Mejorado .....	- 48 -
2.4.3.2. Características Principales.....	- 49 -
2.4.3.3. Tipos De Sensores De Entrada Y Rangos .....	- 49 -
2.4.4. Interruptores Eléctricos (SWITCHES) .....	- 50 -
2.5. ESTRUCTURA .....	- 51 -
3. PRUEBAS Y DISEÑO DE LA PRACTICA DE LABORATORIO .....	- 53 -
3.1. PRUEBAS REALIZADAS .....	- 54 -
3.2. DATOS OBTENIDOS .....	- 54 -
3.2.1. Aleta Anular Pequeña (radio=30 mm) .....	- 55 -
3.2.2. Aleta Longitudinal .....	- 57 -
3.3. RESUMEN DE DATOS.....	- 59 -
3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	- 66 -
3.5. DISEÑO DE LA PRACTICA DE LABORATORIO .....	- 67 -
CONCLUSIONES .....	- 73 -
BIBLIOGRAFÍA.....	- 74 -
ANEXOS .....	- 75 -

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Modos de transferencia de calor.....	- 22 -
Figura 2. a) Superficie lisa. b) Superficie con aletas. ....	- 25 -
Figura 3. Tipos de aletas. (a) Aleta longitudinal. (b) Aleta anular. (c) Aleta de aguja.....	- 26 -
Figura 4. Balance de energía elemento diferencial aleta. ....	- 27 -
Figura 5. Condiciones de contorno en el extremo de la aleta:(a) Convección en el extremo (b) Extremo aislado (c) Longitud infinita. ....	- 29 -
Figura 6. Aleta anular de espesor constante.....	- 31 -
Figura 7. Eficiencia de aletas anulares y rectangulares. ....	- 33 -
Figura 8. Arreglo de aletas.....	- 34 -
Figura 9. Superficie representando las vías paralelas de pérdida de calor. ....	- 35 -
Figura 10. Longitud óptima de una aleta.....	- 36 -
Figura 11. Componentes banco superficies extendidas.....	- 38 -
Figura 12. Aleta longitudinal. ....	- 39 -
Figura 13. Aleta anular. ....	- 40 -
Figura 14. Aletas de agujas diferente material.....	- 41 -
Figura 15. Resistencia eléctrica de cartucho.....	- 42 -
Figura 16. Partes de resistencia eléctrica de cartucho. ....	- 43 -
Figura 17. Sistema eléctrico. ....	- 44 -
Figura 18. Termómetro digital. ....	- 45 -
Figura 19. Parte interna termómetro digital. ....	- 46 -
Figura 20. Relé de estado sólido. ....	- 47 -
Figura 21. Pirómetro TC4. ....	- 48 -
Figura 22. Switches. ....	- 50 -
Figura 23. Conexión Switches. ....	- 51 -
Figura 24. Estructura banco de superficies extendidas.....	- 51 -
Figura 25. Banco de superficies extendidas.....	- 53 -

Figura 26. Temperatura vs tiempo aleta anular  $r=30$ , posición vertical. .... - 56 -  
Figura 27. Temperatura vs tiempo aleta anular  $r=30$ , posición horizontal. .... - 56 -  
Figura 28. Temperatura vs tiempo aleta longitudinal, posición vertical..... - 58 -  
Figura 29. Temperatura vs tiempo aleta longitudinal, posición horizontal. .... - 58 -  
Figura 30. Flujos de calor modo vertical y horizontal. .... - 61 -  
Figura 31. Temperatura base vs tiempo de los diferentes disipadores. .... - 61 -  
Figura 32. Temperatura de punta vs tiempo de los diferentes disipadores. .... - 62 -  
Figura 33. Distribución de temperaturas diferentes disipadores..... - 65 -

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Valores conductividad térmica a 300 K. ....	- 23 -
Tabla 2. Distribucion de temperaturas y pérdidas de calor de seccion transversal uniforme. ....	- 30 -
Tabla 3. Eficiencia de aletas. ....	- 32 -
Tabla 4. Características de operación termómetro digital. ....	- 46 -
Tabla 5. Tipos de sensores de entrada pirómetro ....	- 49 -
Tabla 6. Toma de datos aleta anular $r=30$ . ....	- 55 -
Tabla 7. Toma de datos aleta longitudinal. ....	- 57 -
Tabla 8. Resumen datos tomados. ....	- 59 -
Tabla 9. Temperaturas a lo largo de la aleta longitudinal. ....	- 64 -

## LISTA DE ANEXOS

**Pág.**

Anexo A. Datos de las pruebas realizadas. ....	- 77 -
Anexo B. Tabla de propiedades materiales sólidos. ....	- 83 -

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA EL ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN SUPERFICIES EXTENDIDAS.\*

**AUTORES:** DANNY LIBARDO LEON GOMEZ  
CARLOS ALFREDO MORENO SILVA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Superficies extendidas, aletas, banco de ensayos.

### DESCRIPCIÓN:

El objetivo final del presente trabajo de grado, es el diseño y construcción de un banco de ensayos para el laboratorio de sistemas térmicos, en donde los estudiantes de ingeniería mecánica pueden reforzar los conocimientos ya adquiridos en la materia de transferencia de calor sobre disipación de calor en superficies extendidas, a través de la realización de la práctica puedan calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección y un análisis de cuál es la mejor configuración para la realizar la mayor transferencia de calor al ambiente.

El banco consta de 7 configuraciones de superficies extendidas, a las cuales en su interior para la generación de calor se colocó una resistencia eléctrica tubular. La temperatura de las resistencias está controlada mediante un circuito en paralelo conectado a un pirómetro PID. La práctica consta de analizar los diferentes tipos de aleteadas, a las cuales se les realizan toma de datos en su base y punta mediante termómetros digitales con termocuplas tipo k; para ver el comportamiento térmico en cuanto a configuración y material.

El coeficiente de transferencia de calor por convección será obtenido por medio de la toma de temperaturas de base, punta, ambiente y conociendo la conductividad térmica de cada material y realizando de manera fácil y rápida los cálculos enunciados en este trabajo de grado, el análisis de la mejor configuración se puede realizar de manera visual en las curvas obtenidas al graficar los datos tomados de las aletas en la práctica.

Para el desarrollo del presente trabajo de grado no solo fue de gran ayuda los conocimientos de transferencia de calor, también aplicamos los conocimientos adquiridos en otras áreas complementarias e importantes en la carrera de ingeniería mecánica.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Dr. Ing. David Alfredo Fuentes Díaz.

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TEST BENCH FOR THE STUDY OF HEAT TRANSFER IN EXTENDED SURFACES. \*

**AUTHORS:** DANNY LIBARDO LEON GOMEZ  
CARLOS ALFREDO MORENO SILVA \*\*

**KEY WORDS:** extended surfaces, fins, test bench.

### DESCRIPTION:

The ultimate goal of this degree work is the design and construction of a test bench for thermal systems laboratory, where mechanical engineering students can reinforce the knowledge acquired in the field of heat transfer on heat dissipation Extended surface through the completion of practice to calculate the coefficient of convective heat transfer and an analysis of how best performing configuration for enhanced heat transfer to the environment.

The bank comprises seven configurations extending surfaces to which inside to heat generation was placed a tubular electric resistance. The temperature of the resistors is controlled by a parallel circuit connected to a PID pyrometer. The practice consists of analyzing the different types of fins, to which they perform data collection at its base and tip by digital thermometer k type thermocouples, to see the thermal behavior in configuration and materials.

The coefficient of convective heat transfer is obtained by taking temperatures base tip, environment and knowing the thermal conductivity of each material and conducting quickly and easily set the calculations in this paper grade analysis the best configuration can be done visually in the curves obtained by plotting the data taken from the fins in practice.

For the development of this degree work was not only very helpful knowledge of heat transfer, we also apply the knowledge acquired in other complementary areas and major in mechanical engineering career.

---

\* Work Degree

\*\* Physical-Mechanics engineering Faculty. Mechanical Engineering School. Dr .Eng. David Alfredo Fuentes Díaz.

## INTRODUCCIÓN

Los laboratorios como medio de enseñanza en el estudio de las ingenierías son de gran importancia ya que genera al docente una herramienta como forma de impartir de mejor manera los conocimientos a los estudiantes y a estos una mayor facilidad de asumir los conceptos adquiridos, por medio de experimentos el estudiante puede analizar cuál sería la mejor solución a diferentes problemas plantados a lo largo de la carrera y en el ámbito profesional.

En la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander hay variedad de laboratorios de diferentes materias, esto con el fin de ayudar a los estudiantes de la universidad y de otras universidades con el entendimiento más práctico de los conceptos, para formar así profesionales más íntegros.

En la actualidad parte de los dispositivos eléctricos y mecánicos generan gran cantidad de calor debido a condiciones de operación, por tal razón, se pueden producir daños ocasionados por el aumento de temperatura. La transferencia de calor ayuda a imponer condiciones en los equipos para que funcionen en un punto óptimo de temperatura, es por esto que se les incorporan diferentes sistemas de enfriamiento que permitan un mejor rendimiento. Los sistemas de enfriamiento se clasifican generalmente de acuerdo al tipo de fluido utilizado para enfriar, que en algunos casos es un líquido y en otros es un gas como el aire.

Una de las formas para el aumento de transferencia de calor es mediante la construcción de superficies extendidas. Estas superficies extendidas tienen amplias aplicaciones industriales como aletas fijas o anexas a las paredes del equipo de transferencia de calor, como por ejemplo: en radiadores de automóviles, enfriamiento de equipos eléctricos y electrónicos, en motores de combustión

interna enfriados por aire, en intercambiadores de calor, etc., con el fin de incrementar la rapidez de enfriamiento.

Por este motivo se ha realizado el trabajo de grado titulado “diseño y construcción de un banco de ensayos para el estudio de la transferencia de calor en superficies extendidas” donde se construyó el banco de pruebas para que los estudiantes por medio de una práctica muy sencilla descrita en el capítulo tres de este trabajo de grado, para poder analizar el comportamiento de las aletas a medida que llega a la temperatura de estabilidad, verificar cual es la mejor configuración para la realizar la mayor transferencia de calor al ambiente en cuanto a perfil, material y altura de la aletas y calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección, conociendo la conductividad térmica de cada material, esto se deberá realizar en el laboratorio de la materia sistemas térmicos.

El presente documento se ha organizado de la siguiente manera, en el primer capítulo, se encuentran los conceptos y ecuaciones necesarios para el entendimiento de la transferencia de calor en superficies extendidas. En el segundo capítulo describimos de manera detallada cada una de las partes que conforman el banco de pruebas y el diseño del banco. Por último, en el tercer capítulo se muestran los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el banco, el análisis de resultados y el diseño del laboratorio entre otros.

## 1. GENERALIDADES.

### 1.1. TIPOS DE CALOR

Se ha visto comúnmente que en la naturaleza cuando se le transfiere calor a un cuerpo, este puede llegar a experimentar cambios en su estructura e interior los cuales definen el tipo de calor que le fue trasferido, entre los tipos de calor más comunes son:

**1.1.1. Calor Sensible.** Tipo de calor que hace variar la temperatura ya sea en pocos o muchos grados sin afectar su estructura molecular, es decir no cambia de fase. El calor sensible se puede calcular en algunos casos simples de las siguientes formas dependiendo el tipo de proceso:

Si el proceso se efectúa a presión constante:

$$Q_s = \Delta H = mC_p(t_f - t_i) \quad (1)$$

Dónde:

$\Delta H$ : es el delta de entalpia del sistema.

$C_p$ : es el calor especificó a presión constante.

$t_f$ : Es la temperatura final del cuerpo.

$t_i$ : Es la temperatura inicial del cuerpo.

$m$ : Es la masa del cuerpo.

**1.1.2. Calor Latente.** La palabra latente proviene del latín y significa escondido, esto fue debido a que a un cuerpo que se le sigue adhiriendo calor mientras ocurre un cambio de fase en este cuerpo o sustancia no aumenta su temperatura se creía que este calor quedaba escondido, un ejemplo de esto lo encontramos cuando al aplicarle calor a un bloque de hielo de forma constante este va ascendiendo su

temperatura hasta llegar a los 0° centígrados en esta temperatura se da el cambio de fase de hielo a agua y se seguirá manteniendo a esta temperatura hasta que todo el bloque cambie de estado sólido a líquido esto se debe a que el calor se emplea en la fusión del hielo, también podemos decir que el calor latente es la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, ya sea de sólido a líquido llamado calor de fusión o de líquido a gaseoso llamado calor de vaporización. Y generalmente se calcula de la siguiente manera:

$$Q_l = mL_f \quad (3)$$

Dónde:

m: masa del cuerpo o sustancia.

$L_f$  : Se denomina calor latente de la sustancia por unidad de masa cal/g.

**1.1.3. Calor de Reacción.** Es la cantidad de energía calorífica que el sistema ha de ceder o absorber del ambiente para que la temperatura permanezca constante durante todo el proceso de una reacción química, entonces si el medio exterior o ambiente recibe energía la reacción se denomina exotérmica y si el sistema absorbe energía se llama endotérmica. El calor reactivo lo podemos calcular de la siguiente ecuación:

$$Q_r = H_{productos} - H_{reactivos} \quad (4)$$

**Calor eléctrico:** se entiende por este al calor que se transfiere a causa del paso de la corriente eléctrica a través de un material aislante, este calor lo podemos calcular por medio de la siguiente fórmula:

$$Q_E = I^2 R \quad (5)$$

Dónde:

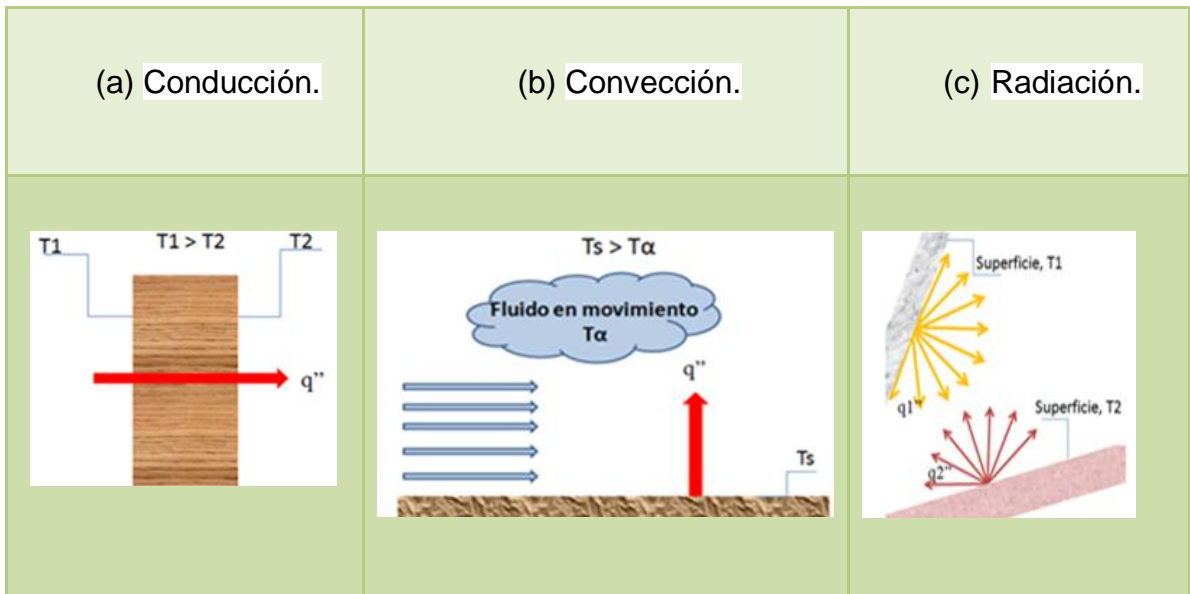
I: es la corriente eléctrica.

R: es la resistencia.

## 1.2. TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor se define como la energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura. Cuando un cuerpo, que puede ser un sólido o un fluido, está a una temperatura diferente de la de su entorno, la transferencia de energía térmica ocurre de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen equilibrio térmico, mediante los diferentes modos: conducción, convección y radiación.

Figura 1. **Modos de transferencia de calor.**



**Fuente:** Autores de proyecto.

Si en sólido o en un flujo estacionario existe una diferencia o gradiente de temperatura, su transferencia de calor ocurre mediante la **conducción** (figura 1. a); la cual se considera como una transferencia de energía de sus partículas más energéticas a aquellas menos energéticas. La ley que rige este fenómeno térmico fue definida por el físico y matemático J.B. Fourier en el año de 1822. Realizando él estudio a sistemas unidimensional, esta ley define la ecuación para la conducción, como:

$$q_x = -KA \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Donde  $K$  es la conducción térmica, y es una característica de cada material (se presenta en la tabla 1. algunos valores de  $K$  para diferentes materiales). El signo negativo indica la dirección en que el calor debe fluir; de la temperatura más alta a la más baja.

**Tabla 1. Valores conductividad térmica a 300 K.**

Material	$k$ (w/m k)
Cobre	386
Aluminio (70% Cu, 30% Zn))	204
Bronce (70% Cu, 30% Zn))	111
Acero dulce	64
Acero inoxidable	15
Mercurio	8,4
Concreto	1,4
Vidrio Pyrex	1,09
Agua	0,611
Neopreno	0,19
Aceite para Motores, SAE 50	0,145
Pino blanco, en la dirección perpendicular a la veta	0,1
Cloruro de polivinilo (PVC)	0,092
Freón 12	0,071
Corcho	0,043
Fibra de vidrio (densidad media)	0,038
Poliestireno	0,028
Aire	0,027

**Fuente:** Transferencia de calor Mills.

A la **convección** se le describe como la transferencia de calor de una superficie sólida y un fluido o gas adyacentes que se encuentra en movimiento (Figura 1. b). La convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del fluido. Se puede dar de forma natural, la cual el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a

partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura y de forma forzada, cuando el flujo es causado por medio de mecanismos externos que aumenten el coeficiente de convección.

La transferencia de calor por convección se expresa con la Ley del Enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = h A_s (T_s - T_f) \quad (7)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de convección,  $A_s$  es el área superficial en la cual tiene lugar la convección,  $T_s$  es la temperatura superficial del cuerpo y  $T_f$  es la temperatura del fluido o gas que rodea al cuerpo.

Un tercer modo es **la radiación** (Figura. 1 (c)), la cual define como “la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos y moléculas”<sup>1</sup>, cuando esta se encuentra a una temperatura diferente del cero absoluto. A diferencia de la convección y la radiación este modo de transferencia de calor no requiere un medio interpuesto o material, de hecho este modo es más eficiente en el vacío. La velocidad máxima emitida por una superficie desde una temperatura  $T_s$ , es establecida por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (8)$$

Dónde:  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$  llamada constante de Stefan-Boltzmann,  $\varepsilon$  es la emisividad de la superficie con valores que varían entre 0 y 1, donde 1 define a un cuerpo con mayor capacidad de emisión, llamado cuerpo negro.

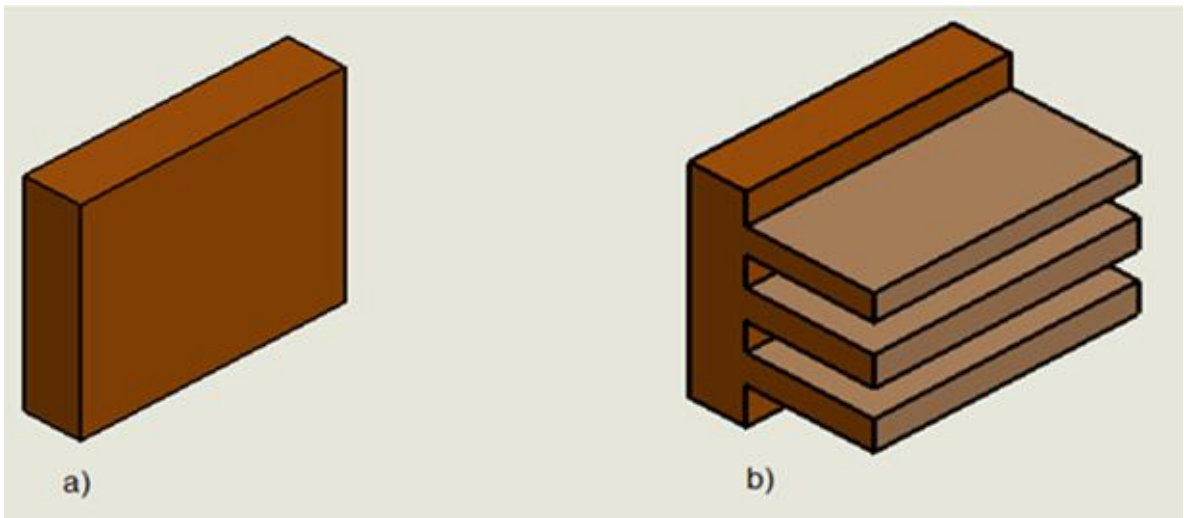
---

<sup>1</sup>Cengel, Yunus A. (2004). Transferencia de calor (2ªEd.). México: McGraw-Hill Interamericana.

### 1.3. TRANSFERENCIA DE CALOR EN SUPERFICIES EXTENDIDAS

Las superficies extendidas son utilizadas para el aumento de la transferencia de calor entre un sólido y un fluido contiguo. Debido a la ecuación de disipación de calor por convección (ec.1) existen diferentes formas de aumento del calor disipado para lograr un enfriamiento sobre un cuerpo sólido. En primer lugar, se podría disminuir la temperatura ambiente, debido a que la temperatura de superficie es un factor de diseño constante, esto es inusual y nada práctico. En segundo lugar, se podría aumentar el coeficiente convectivo de un entorno natural a un forzado, con la aplicación de factores externos, como lo son el uso de bombas o ventiladores que aumente la velocidad del fluido. Esta solución es en ocasiones práctica, pero su costo-beneficio no es alto. Para un mayor costo-beneficio se tendría una tercera opción la cual sería un aumento del área superficial en la cual se desea el aumento de la convección (Fig. 2).

**Figura 2. a) Superficie lisa. b) Superficie con aletas.**



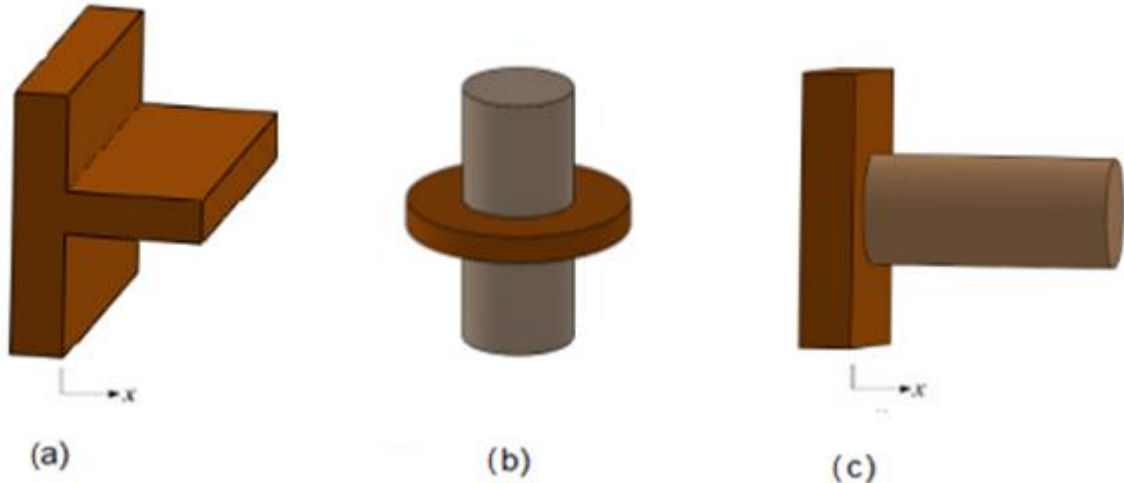
**Fuente:** Autores de proyecto.

La conductividad térmica del material de la aleta influye en el aumento del flujo de calor para una mejor distribución de temperaturas a lo largo de la aleta. El material

de la aleta debe tener una conductividad térmica grande para minimizar variaciones de temperatura desde su base a la punta. Las superficies extendidas son muy utilizadas en las diferentes industrias y en la vida diaria; algunos ejemplos son: arreglos para enfriar cabezas de motor de motocicletas, cortadoras de césped, enfriamiento de componentes electrónicos, así como de los tubos del condensador de un refrigerador doméstico, las cuales poseen diseños innovadores para las diferentes necesidades.

**1.3.1. Tipos de Aletas.** Existen diferentes tipos de aletas, las más comunes se muestran en la figura 3. El tipo de forma que toman las aletas son muy variadas, dependiendo en gran medida de la aplicación y del sólido al que son adicionadas.

**Figura 3. Tipos de aletas. (a) Aleta longitudinal. (b) Aleta anular. (c) Aleta de aguja.**



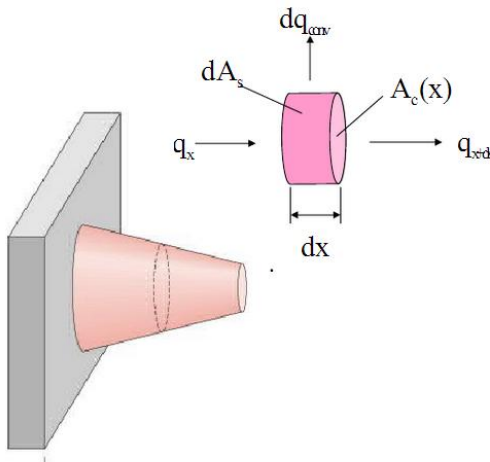
**Fuente:** Autores de Proyecto.

Las aletas de tipo longitudinal se definen como superficies adicionales unidas a paredes planas o cilíndricas. Las aletas anulares están unidas coaxialmente a

superficies cilíndricas. Las aletas de agujas es la prolongación de una sección transversal circular o cónica.

**1.3.2. Ecuación Diferencial y Condiciones de Contorno.** La conducción alrededor de una aleta generalmente es bidimensional, sin embargo, en la práctica la aleta es delgada y los cambios de temperatura en la dirección longitudinal son muchos más grandes que los de la dirección transversal, por tanto suponemos: conducción unidimensional en la dirección  $x$ , condiciones de estado estable, conductividad térmica constante, unión entre aletas y tubos no ofrece resistencia térmica, radiación desde la superficie es insignificante, los efectos de la generación de calor están ausentes y el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  es uniforme sobre la superficie.

**Figura 4. Balance de energía elemento diferencial aleta.**



**Fuente:** Transferencia de calor Incropera.

Del balance sobre la Figura 4, se obtiene:

$$q_x = q_{x+dx} + dq_{conv} \quad (9)$$

Según la ley de Fourier:

$$q_x = -kA_C \frac{dT}{dx} \quad (10)$$

Donde  $A_c$  es el área de la sección transversal, que varía en dirección  $x$ . como la conducción de calor en  $(x + dx)$ , se expresa como:

$$q_{x+dx} = q_x + \left( \frac{dq_x}{dx} * dx \right) \quad (11)$$

$$q_{x+dx} = -k * A_c * \frac{dT}{dx} - k * \left( \frac{dT}{dx} \right) (A_c * \frac{dA_c}{dx}) dx \quad (12)$$

Sabemos que:

$$dq_{conv} = h * dA_s * (T - T_a) \quad (13)$$

Dónde:

As: es el área superficial del elemento diferencial.

Sustituyendo todas las ecuaciones en la ecuación 9, tenemos

$$\frac{d}{dx} (A_c * \frac{dT}{dx}) - \frac{h}{K} \frac{dA_s}{dx} * (T - T_\infty) = 0 \quad (14)$$

o

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \left( \frac{1}{A_c} * \frac{dA_c}{dx} * \frac{dT}{dx} \right) - \left( \frac{1}{A_c} * \frac{h}{K} * \frac{dA_s}{dx} \right) * (T - T_\infty) = 0 \quad (15)$$

**1.3.2.1. Sección Transversal Uniforme:** Se resuelve la ecuación (15) para sección transversal uniforme (caso de estudio) donde,  $\frac{dA_c}{dx} = 0$  :

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{hP}{KA_c} (T - T_\infty) = 0 \quad (16)$$

Para la solución de la ecuación anterior, se toma para facilitar la solución:

$$\theta = T(x) - T(\infty) \quad (17)$$

Como  $T_\infty = \text{constante}$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{dT}{dx} \quad (18)$$

Por lo que la ecuación anterior quedaría como:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m\theta = 0 \quad (19)$$

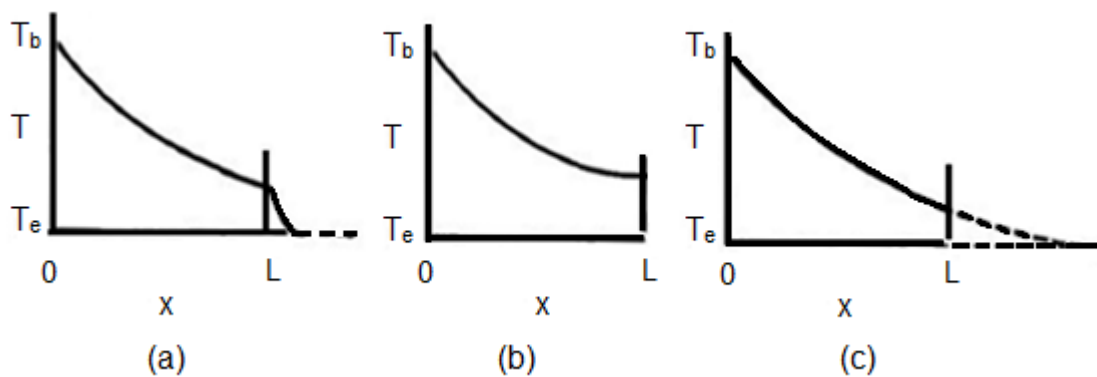
$$\text{Dónde: } m^2 = \frac{hP}{KA_c} \quad (20)$$

Esta ecuación (18), es una ecuación diferencial lineal de segundo orden, homogénea con coeficientes constantes. Su solución general es:

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad (21)$$

Para la evaluación de las constantes  $C_1$  y  $C_2$ , se toma tres condiciones de solución: (a) pérdida de calor por convección, (b) Extremo aislado y (c) aleta de longitud infinita; el comportamiento de temperatura a lo largo de la aleta se visualiza en la figura 5.

**Figura 5. Condiciones de contorno en el extremo de la aleta:(a) Convección en el extremo (b) Extremo aislado (c) Longitud infinita.**

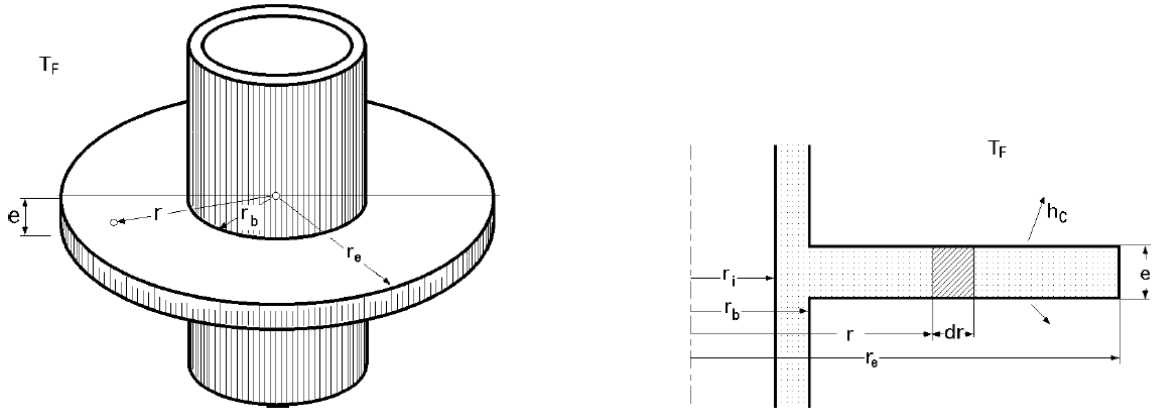


**Fuente:** transferencia de calor Mills.



### 1.3.2.2. Sección Transversal Variable

Figura 6. Aleta anular de espesor constante.



Fuente: <http://www.uantof.cl/caim/Asignaturas/Transferencia>.

Para aletas de sección transversal que varía con el radio y espesor constante, la solución de la forma general de la aleta (ecuación 15) se reduce a:

$$\frac{d^2\theta}{dr^2} - \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dr} - \frac{hP}{KA_c} \theta = 0 \quad (22)$$

Sabiendo que:

$$\theta = C_1 I_0(mr) + C_2 K_0(mr) \quad (23)$$

Siendo  $I_0$  y  $K_0$  la función modificadas de Bessel de primera y segunda especie de orden cero;  $C_1$  y  $C_2$  son constantes de integración.

Solucionando la ecuación (22), estableciendo  $\theta(r) = \theta(b)$  y periferia adiabática; la distribución de temperatura en la aleta es:

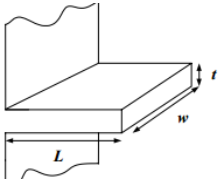
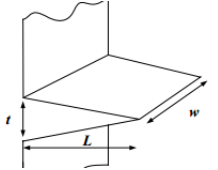
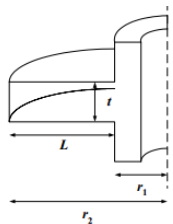
$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{I_0(mr) K_1(mr_e) + K_0(mr) I_1(mr_e)}{I_0(mr_b) K_1(mr_e) + K_0(mr_b) I_1(mr_e)} \quad (24)$$

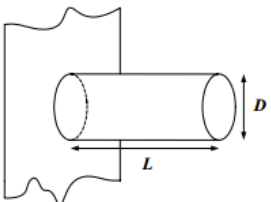
Dónde:  $m = (2 h / K e)^{1/2}$

(25)

**1.3.3. Eficiencia Global De Una Aleta.** Las eficiencias globales de las aletas se resumen en la tabla 4 o por medio de las curvas de eficiencia de aletas figura 7, para los tipos de aletas más comunes:

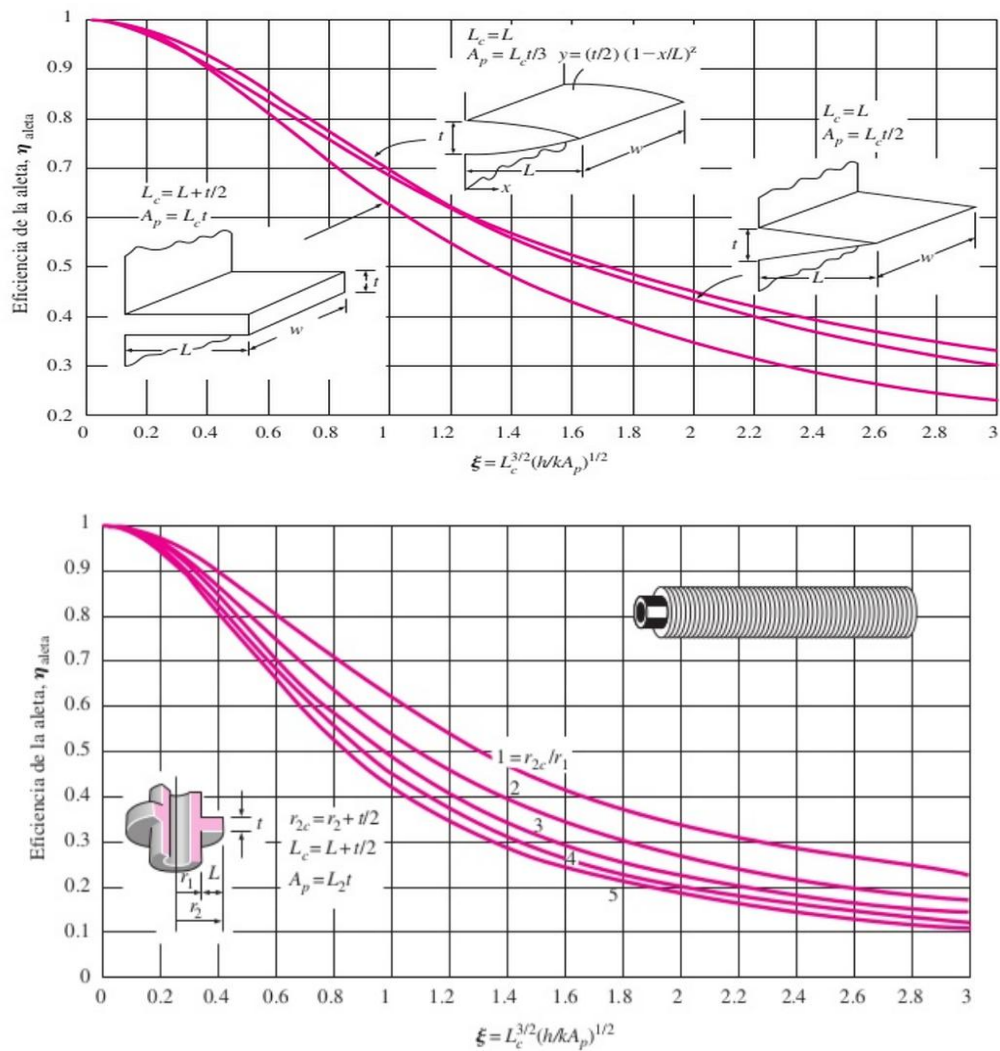
**Tabla 3. Eficiencia de aletas.**

Esquema	Dimensiones	Eficiencia
	$A_f = 2wL_c$ $L_c = L + t/2$	$\eta_f = \frac{\tanh mL_c}{mL_c}$
	$A_f = 2w[L^2 + (t/2)^2]^{1/2}$	$\eta_f = \frac{1}{mL} \frac{I_1(2mL)}{I_0(2m)}$
	$A_f = 2\pi(r_{2c}^2 - r_1^2)$ $r_{2c} = r_2 + (t/2)$	$\eta_f = C_2 \frac{K_1 mr_1 I_1 mr_{2c} - I_1(mr_1)K_1(mr_{2c})}{I_0 mr_1 K_1 mr_{2c} - K_0(mr_1)I_1(mr_{2c})}$ $C_2 = \frac{(2r_1/m)}{(r_{2c}^2 - r_1^2)}$

Esquema	Dimensiones	Eficiencia
	$A_f = \pi D L_c$ $L_c = L + D/4$	$\eta_f = \frac{\tanh mL_c}{mL_c}$

Fuente: Transferencia de calor Incropera.

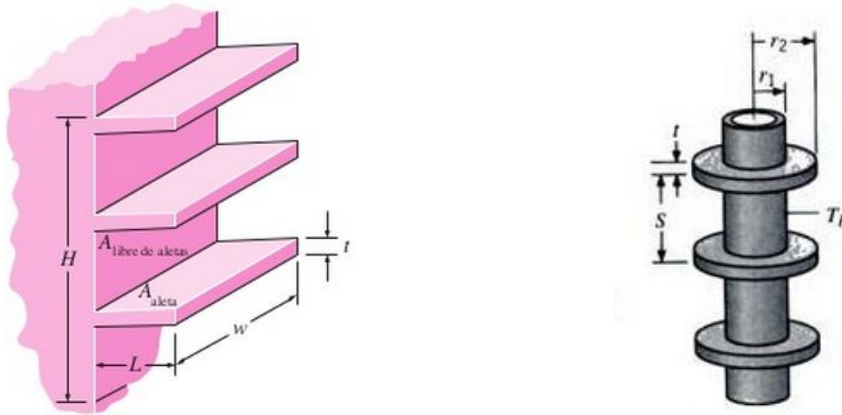
Figura 7. Eficiencia de aletas anulares y rectangulares.



Fuente: Transferencia de calor Cengel.

**1.3.4. Eficiencia De Superficies Aleteadas.** La eficiencia global en superficies aleteadas representa a un arreglo de aletas y la superficie base a la que se une, como se muestra en la figura 8, donde S designa el espaciamiento entre aletas; en cada caso la eficiencia global se define como:

**Figura 8. Arreglo de aletas.**



**Fuente:** Transferencia de calor Cengel y Incropera.

$$\eta_0 = \frac{q_t}{q_{\max}} = \frac{q_t}{hA_f\theta_b} \quad (26)$$

Definiendo a:

$q_t$ = Transferencia de calor total.

N= Número de aletas en el arreglo, cada una de las áreas superficiales.

$A_f$  = Área de aleta.

$A_b$ = Área de base sin aletas.

El área de la superficie total es:

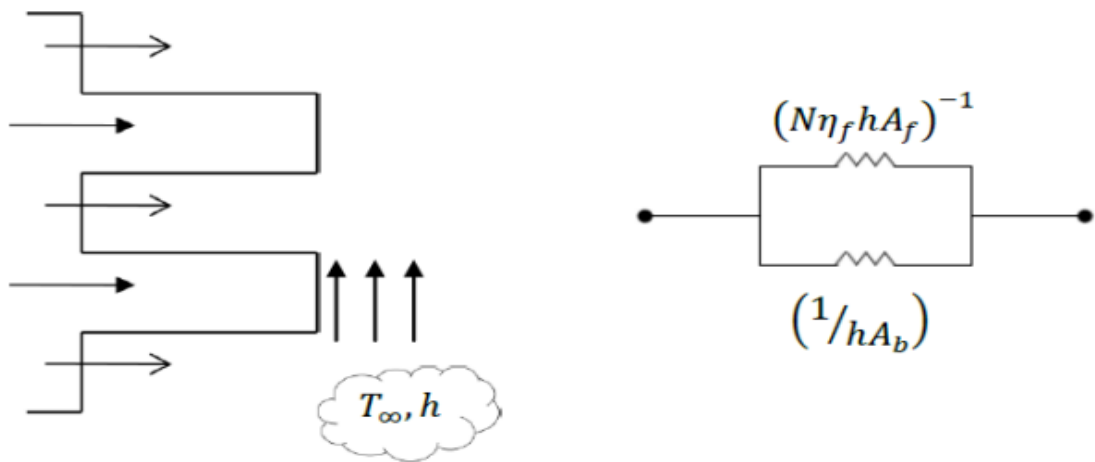
$$A_t = NA_f + A_b \quad (27)$$

La pérdida de calor ocurre en dos vías paralelas desde la base de las superficies aleteadas: una a través de las aletas y otra a través del espacio entre aletas (ver figura 9). Definiendo la transferencia de calor total como:

$$q_t = N\eta_f h A_f \theta_b + h A_b \theta_b \quad (28)$$

Donde el coeficiente de convección (h) se supone igual para la base sin aletas y con aletas.

**Figura 9. Superficie representando las vías paralelas de pérdida de calor.**



**Fuente:** Transferencia de calor Mills.

De este modo se tiene:

$$q = h \left[ N\eta_f A_f + (A_f - NA_f) \right] \theta_b = h A_f \left[ 1 - \frac{NA_f}{A_t} (1 - \eta_f) \right] \theta_b \quad (29)$$

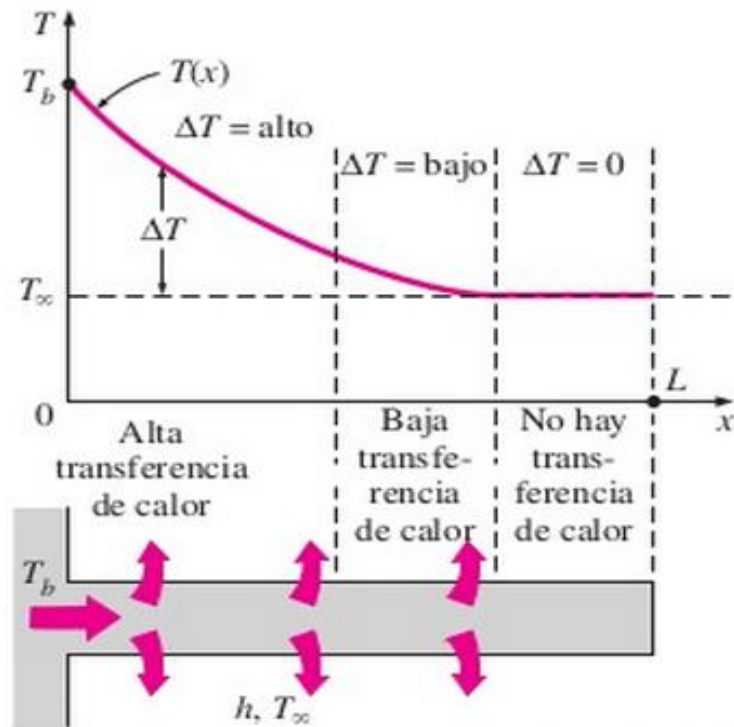
Al sustituir la ecuación (28) en (25) :

$$\eta_0 = 1 - \frac{NA_f}{A_t} (1 - \eta_f) \quad (30)$$

La ecuación (30) me define la eficiencia global de superficies aleteadas.

**1.3.5. Longitud Óptima de una Aleta.** Se define como un paso importante en el diseño de las aletas, la selección de la longitud óptima para el cumplimiento adecuado de pérdida de calor, después de la selección del tipo de material y la sección transversal. Se podría llegar a pensar que entre más larga la aleta, mayor es su área superficial y, por lo tanto hay más pérdida de calor. Esto llevaría a creer que la mejor opción serían las aletas extra largas, lo cual es erróneo, debido a la caída de temperatura a lo largo de la misma es exponencial y tiende a igualarse con la temperatura ambiente, por consiguiente después de cierta longitud no contribuye a grandes pérdidas de calor, lo que produce un desperdicio en material, mayor peso y costos adicionales por poco beneficio (ver figura 10).

**Figura 10. Longitud óptima de una aleta**



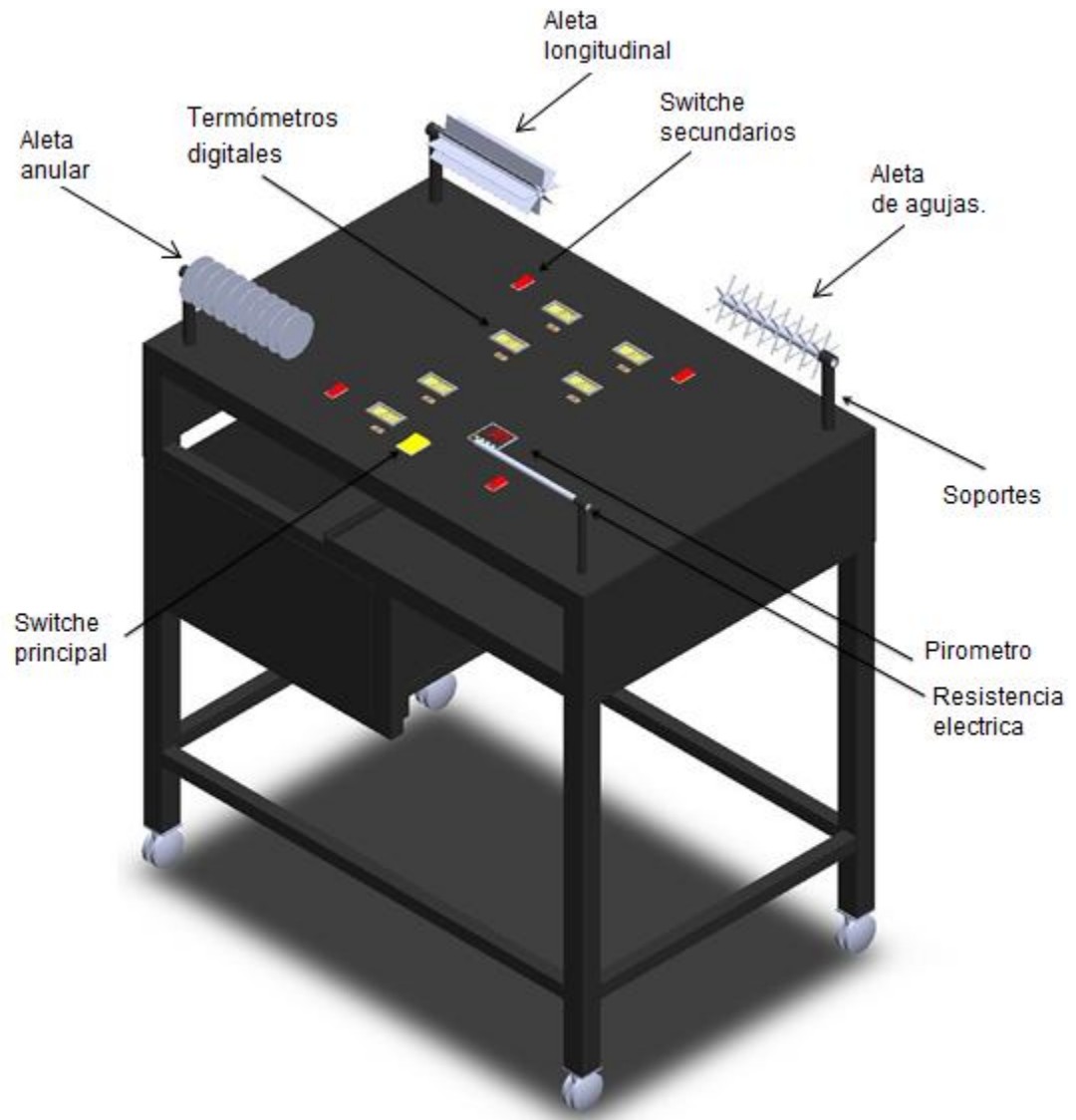
**Fuente:** Transferencia de calor Cengel.

## 2. DESCRIPCIÓN Y SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL BANCO DE PRUEBAS

El dispositivo experimental desarrollado en este trabajo de grado, se conforma por las partes que se observan en la figura 11 y describen detalladamente a continuación:

- **Aletas de pruebas:** se compone de tres aletas agujas de diferente material, tres aletas anulares de diferente radio de aleta y una de aleta de longitudinal.
- **Sistema generador de calor:** Resistencias eléctricas una para cada tipo de aleta, con potencia máxima de 160 vatios.
- **Sistema eléctrico:** conexiones para el control y suministro de potencia al circuito eléctrico del banco; está compuesto por: resistencias eléctricas, pirómetro, SSR y switches.
- **Elementos de medición, censado y control.** Elementos diseñados para el control de la temperatura y la visualización de las mismas dentro de cada sistema disipador de calor.
- **Estructura.** Se encarga de soportar el peso y guardar todos los equipos y elementos que se compone el banco.

**Figura 11. Componentes banco superficies extendidas.**



**Fuente:** Autores de proyecto.

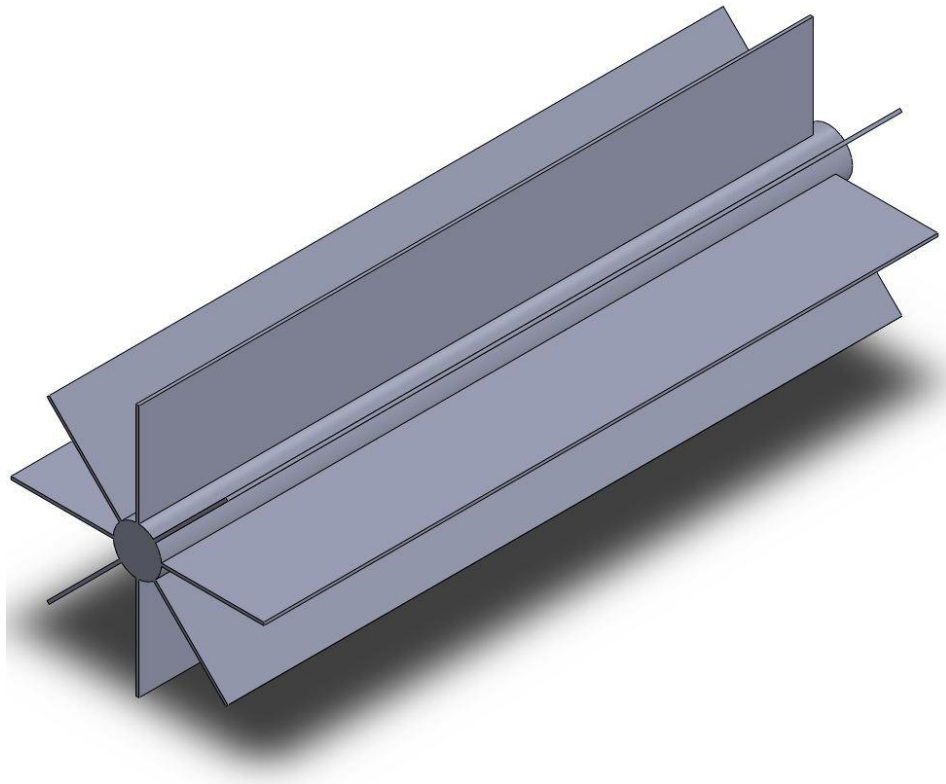
## 2.1. ALETAS DE PRUEBA

Las diferentes aletas para la realización de las pruebas en el banco están compuestas por:

- Tres aletas de agujas con la misma configuración dimensional variando el material de fabricación; acero inoxidable, aluminio y bronce.
- Tres aletas anulares de mismo material (acero inoxidable) con configuración similar variando el radio de altura de la aleta entre 30mm, 40mm y 50mm.
- Una aleta longitudinal de acero inoxidable.

### 2.1.1. Aletas Longitudinales

**Figura 12. Aleta longitudinal.**



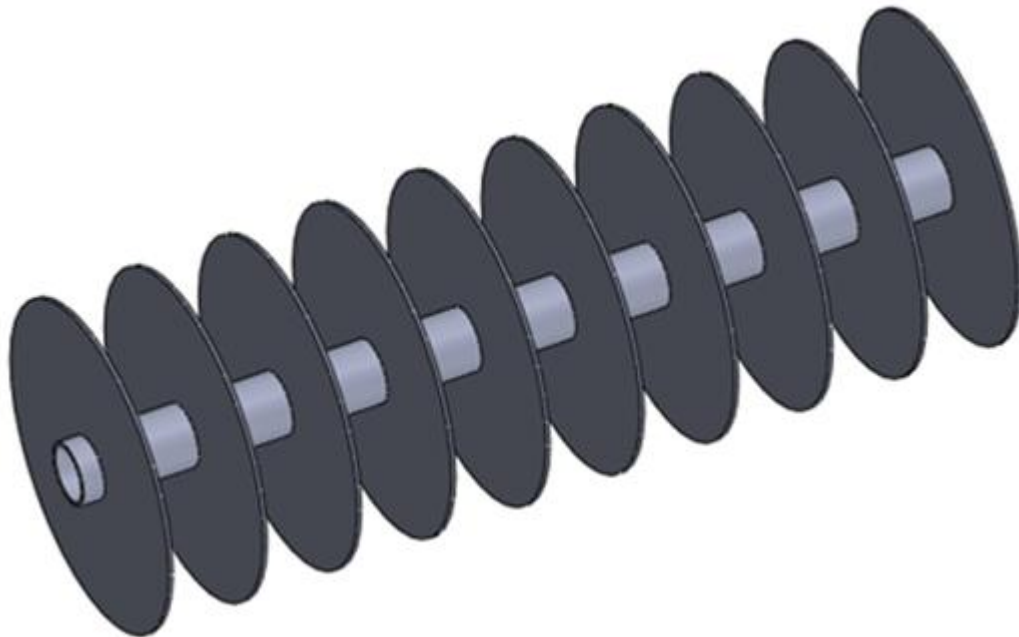
**Fuente:** Autores del proyecto.

Estas aletas están compuestas en su base por una barra cilíndrica de acero inoxidable de  $\frac{3}{4}$ " en su diámetro exterior, la cual fue maquinada para obtener un diámetro interno de  $\frac{1}{2}$ ". Se sueldan por medio de soldadura de argón, ocho

rectángulos cortados con láser de dimensiones 200 x 30 mm del mismo material a lo largo de la barra cilíndrica base, con un paso de 45° en el perímetro así como indica en la figura 12. En el interior lleva una resistencia eléctrica, la cual fue introducida por calentamiento de la pieza base y forzando la resistencia con una prensa hidráulica para obtener un acople a la base sin ningún tipo fuego entre la resistencia y el diámetro interno de la base. Finalmente para dar un mejor acabado a las aletas disipadoras de calor se realizó el proceso de sandblasteado el cual consiste en impactar la pieza con un chorro de aire y arena a alta presión para dar una mejor apariencia.

### **2.1.2. Aletas Anulares.**

**Figura 13. Aleta anular.**



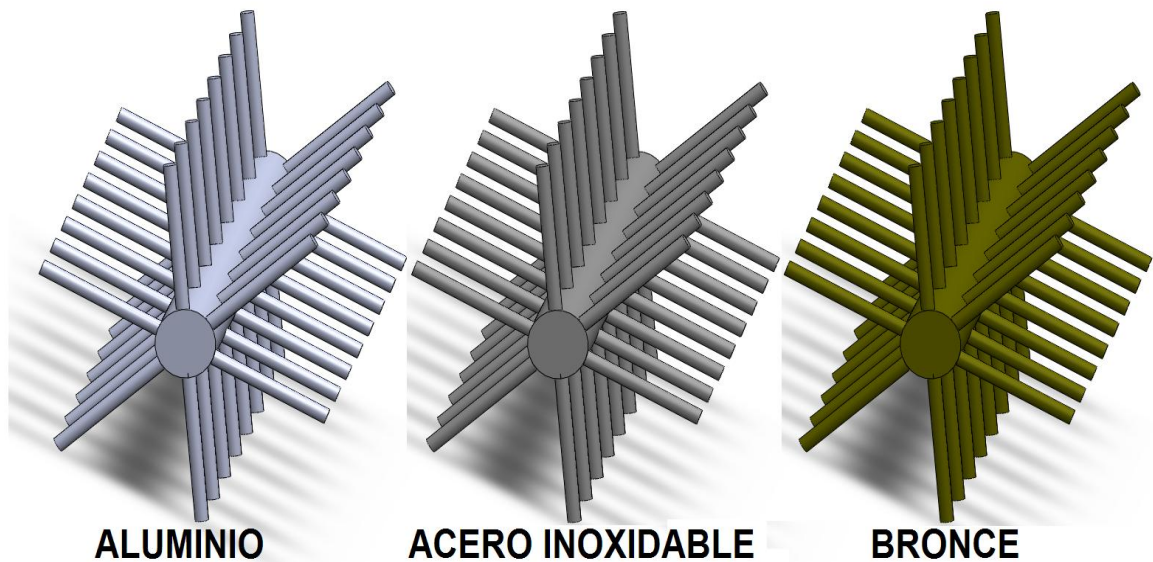
Fuente: Autores del proyecto.

Estas aletas están compuestas en su base por una barra cilíndrica de acero inoxidable de  $\frac{3}{4}$ " en su diámetro exterior, la cual fue maquinada para obtener un

diámetro interno de  $\frac{1}{2}$ ". Se sueldan por medio de soldadura de argón diez arandelas de acero inoxidable cortados con láser, de diámetro interior  $\frac{3}{4}$ " y diámetro exterior para cada configuración de 80mm, 100mm y 120mm, con paso entre arandelas de 22 mm, así como indica en la figura 13. En el interior lleva una resistencia eléctrica la cual requirió de mismo proceso de la configuración anterior. Finalmente para dar un mejor acabado a las aletas disipadoras de calor se realizó el proceso de sandblasteado el cual consiste en impactar la pieza con un chorro de aire y arena a alta presión para dar una mejor apariencia.

### 2.1.3. Aletas de Agujas

Figura 14. Aletas de agujas diferente material.



**Fuente:** Autores del proyecto.

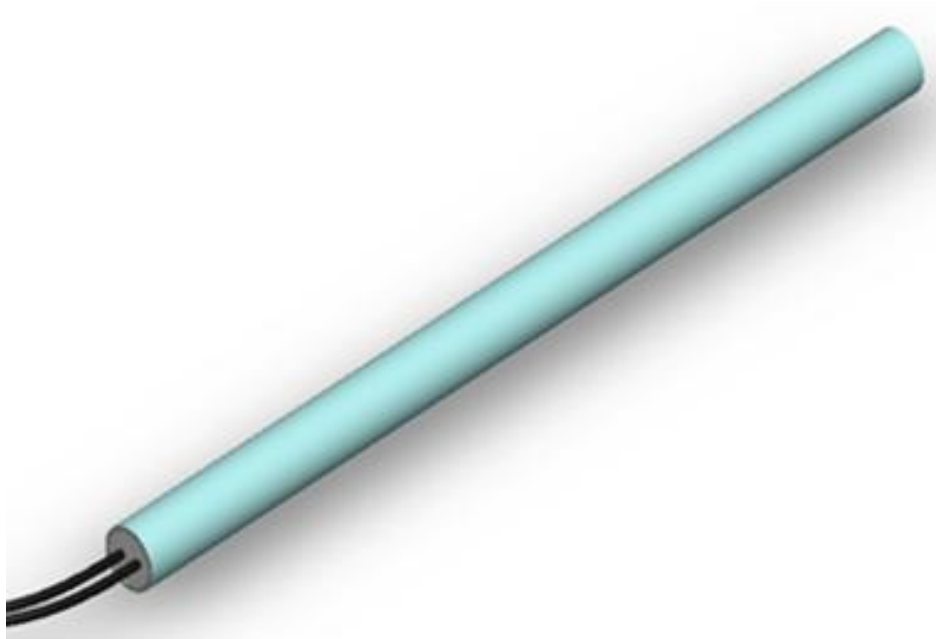
Están compuestas en su base por barras cilíndricas de acero inoxidable, aluminio y bronce, estas barras se han maquinado para la obtención de un diámetro interno de  $\frac{1}{2}$ ", con diámetro exterior de  $\frac{3}{4}$ " a la cual se le perforan 48 agujeros de  $\frac{1}{8}$ " de diámetro, en un paso de 28,12 mm y un ángulo de  $60^\circ$ , para poder soldar con

mayor facilidad y precisión varillas macizas de 1/8" de diámetro, 30 mm de largo por medio de soldadura de argón y otros medios, como se ilustra en la Figura 14. En el interior lleva una resistencia eléctrica la cual requirió de mismo proceso de la configuración anterior. Finalmente para dar un mejor acabado a las aletas disipadoras de calor se realizó el proceso de sandblasteado el cual consiste en impactar la pieza con un chorro de aire y arena a alta presión para dar una mejor apariencia.

## **2.2. SISTEMA GENERADOR DE CALOR**

### **2.2.1. Resistencia Eléctrica**

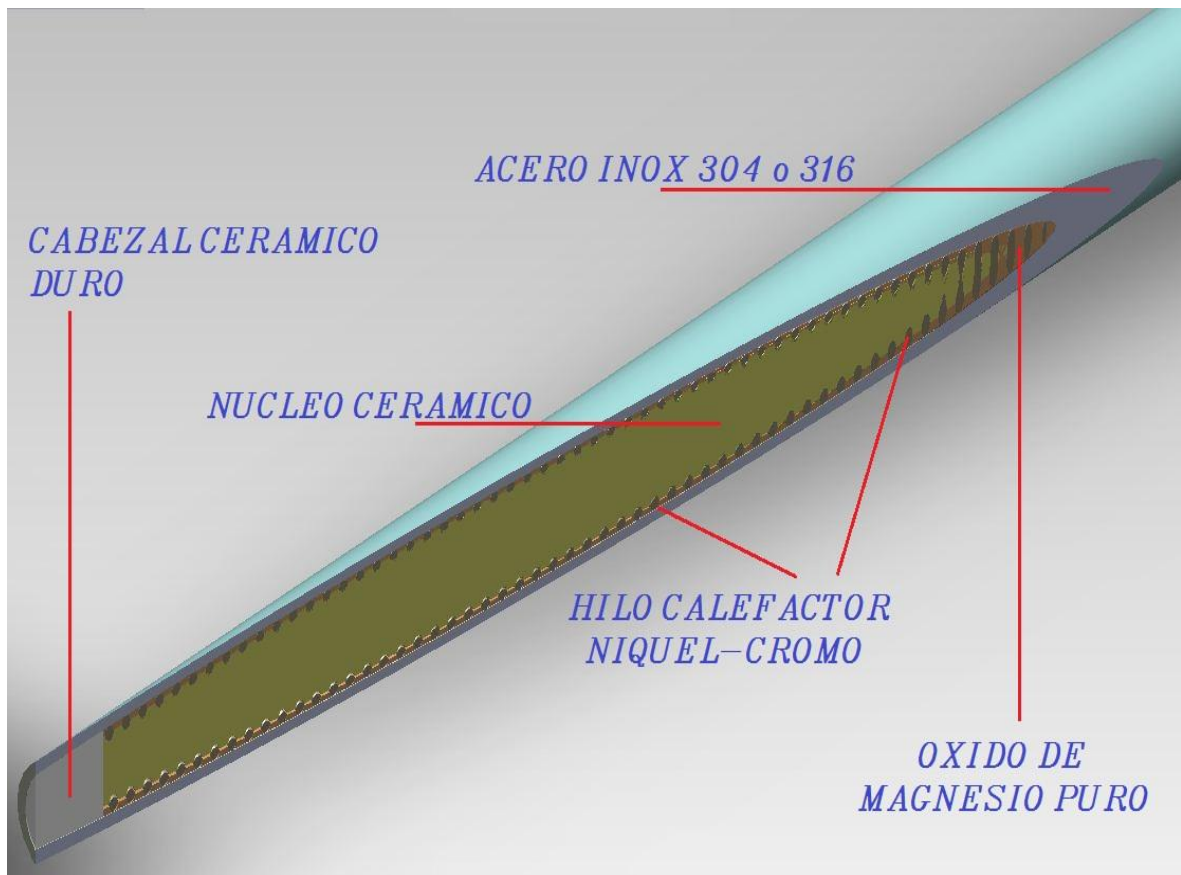
**Figura 15. Resistencia eléctrica de cartucho.**



**Fuente:** Autores del proyecto.

Encargada de suministrar el calor al interior de la aleta; la resistencia está construida por una aleación de níquel-cromo 80/20 con punto de fusión de más de 1300°C, se genera un hilo de esta aleación y le da forma de resorte (espiral), este espiral se aloja en un soporte de cerámica técnica de alta pureza, rellenando los espacios con oxido de magnesio. Finalmente se introduce en una vainas de acero inoxidable AISI 304 o 316 (los terminales en el inicio y fin de la vaina son de pasta dura refractaria). Esta resistencia eléctrica tiene una longitud de 20 cm y un diámetro de ½”, se conecta a una fuente de voltaje de 110 voltios.

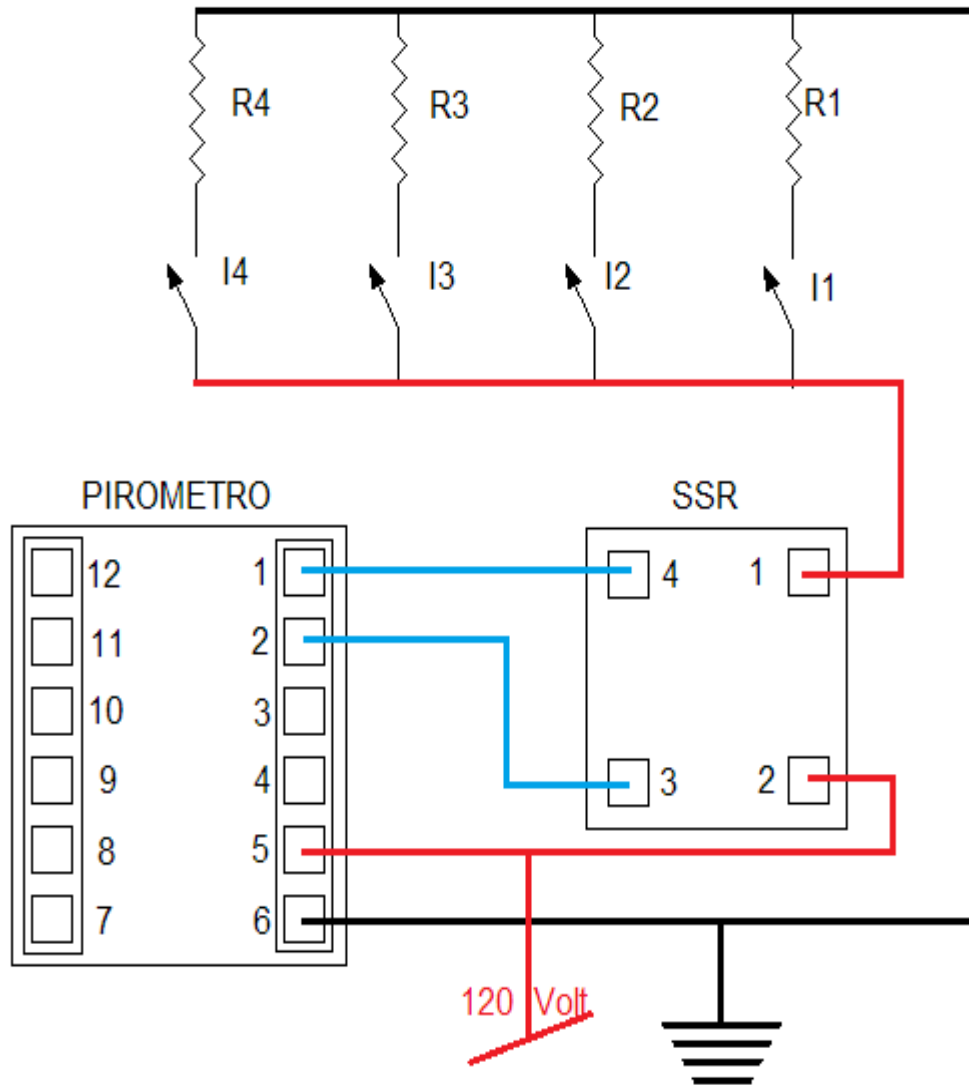
**Figura 16. Partes de resistencia eléctrica de cartucho.**



**Fuente: Autores del proyecto.**

### 2.3. SISTEMA ELECTRICO

Figura 17. Sistema eléctrico.



**Fuente:** Autores del proyecto.

La función de este sistema es suministrar y controlar la energía de los equipos eléctricos que se encuentren presentes en el banco de pruebas, tales como: resistencias, relé de estado sólido, pirómetro y switches.

El sistema está conectado a una red de 110 voltios, y que permite energizar de forma independiente uno o varios de los elementos y equipos requeridos en el banco de pruebas como se ilustra en la figura 17.

## 2.4. ELEMENTOS DE MEDICION CENSADO Y CONTROL

### 2.4.1. Termómetros Digitales

**Figura 18. Termómetro digital.**



**Fuente:** Autores del proyecto.

Estos termómetros están diseñados para ser usados con termocuplas tipo K que puede medir temperaturas desde  $-50^{\circ}\text{C}$  hasta los  $1300^{\circ}\text{C}$ , con una resolución de  $0.1^{\circ}\text{C}$  y una precisión de acuerdo a la temperatura censada como se indica en la siguiente tabla:

**Tabla 4. Características de operación termómetro digital.**

Rango de temperaturas (°C)	Precisión (°C)
$-50 < t < -40$	$\pm 4$
$-40 < t < 0$	$\pm 3$
$0 < t < 100$	$\pm 2$
$100 < t < 750$	$\pm(0.75\%+1)$
$750 < t < 1300$	$\pm(1\%+1)$

**Fuente:** Catalogo de operación termómetros.

El dispositivo cuenta con una pantalla LCD para la visualización de la temperatura, es energizado por una fuente de 9 voltios, la cual es suministrado por una batería conectada directamente a cada dispositivo. Tienen un peso aproximado de 70 gramos, se debe trabajar en un ambiente menor o igual a 80% de humedad relativa y en un rango de temperatura de 0°C a 50°C para evitar futuros daños en los componentes.

**Figura 19. Parte interna termómetro digital.**



**Fuente:** Autores del proyecto.

## 2.4.2. Relé de Estado Sólido (SSR)

Figura 20. Relé de estado sólido.



**Fuente:** Autores del proyecto.

El relé de estado sólido o SSR por sus siglas en inglés de Solid State Relays son dispositivos que usan transistores y tiristores para sustituir los contactos mecánicos usados en los relés electromecánicos, esto para controlar elevadas cargas de potencias dentro de un circuito eléctrico a partir de unas señales de control provenientes de un dispositivo que vienen con bajo voltaje e intensidad, permitiendo así abrir o cerrar el paso de corriente eléctrica al circuito a medida que este lo requiera usando dispositivos con mayor precisión y de menor tamaño que generan señales de baja intensidad sin que este sea afectado por las elevadas cargas de potencial del circuito primario.

Ventajas de usar SSR:

- Gran resistencia a choques y vibraciones
- No ocasionan arcos ni rebotes al no existir partes móviles.
- Vida de trabajo óptima
- Frecuencia de conmutación elevada

- Facilidad de mantenimiento
- Funcionamiento silencioso
- Control a baja tensión, compatible

### 2.4.3. Control de Temperatura (Pirómetro PID)

Figura 21. Pirómetro TC4.



Fuente: [www.autonics.com](http://www.autonics.com)

**2.4.3.1. Funciones Esenciales Y Rendimiento Mejorado:** Serie TC – Uno de los controladores de temperatura con soluciones efectivas, funciones esenciales y rendimiento mejorado - realiza un control de temperatura ideal por medio del desarrollo del nuevo algoritmo de control PID y alta velocidad de muestreo a 100ms. Especialmente, la salida SSRP y la salida de relevador son compatibles para realizar un control efectivo y preciso; además, la Serie TC también se caracteriza por su tamaño compacto y su visibilidad mejorada

### 2.4.3.2. Características Principales

- Velocidad de muestreo a 100ms.
- Incluye salida a relevador y salida SSRP seleccionable.
- Incrementa drásticamente la visibilidad por medio de un display amplio y LED de alta luminosidad.
- Ahorro de espacio gracias a su diseño compacto: minimizado aproximadamente 38% (60mm) de profundidad en comparación con modelos anteriores.
- Desviación entre SV y PV indicable.

### 2.4.3.3. Tipos De Sensores De Entrada Y Rangos

**Tabla 5. Tipos de sensores de entrada pirómetro**

Input sensor		Display	Temperature range(°C)	Temperature range(°F)
Thermo Couple	K(CA)	PERR	-50 to 1200	-58 to 2192
	J(IC)	JIE	-30 to 500	-22 to 932
	L(IC)	LIE	-40 to 800	-40 to 1472
RTD	DPt100Ω	dPE.H	-100 to 400	-148 to 752
		dPE.L	-100.0 to 400.0	-148.0 to 752.0
	CU50Ω	EU5.H	-50 to 200	-58 to 392
		EU5.L	-50.0 to 200.0	-58.0 to 392.0

**Fuente:** [www.autonics.com](http://www.autonics.com)

#### 2.4.4. Interruptores Eléctricos (SWITCHES)

Figura 22. Switches.

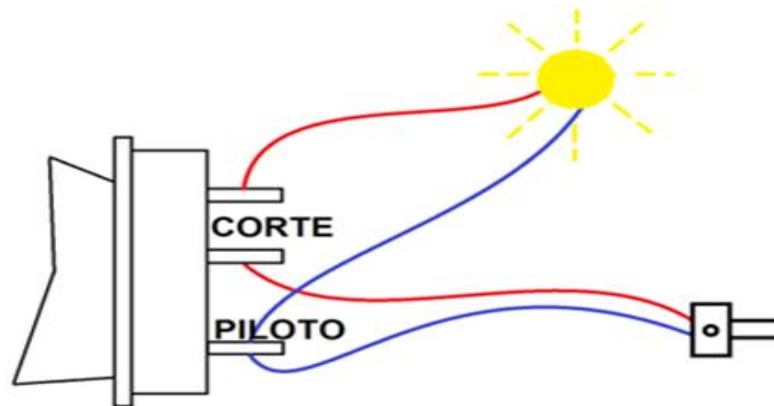


**Fuente:** Autores de proyecto.

Es un dispositivo que permite fácilmente interrumpir o permitir el paso de corriente eléctrica hacia un determinado elemento o circuito, consiste en dos contactos generalmente de acero inoxidable y un actuante, los contactos por medio del actuante se unen para permitir el paso de la corriente hacia el circuito o se separan para cortar el flujo de corriente y apagar el circuito.

Los interruptores seleccionados para el banco cuentan con sistema que enciende una luz para indicarnos en qué momento el interruptor se encuentra con los contactos unidos permitiendo el paso de corriente. Para que este interruptor funcione de manera correcta hay que realizar la conexión con un cable piloto como se indica en la figura 23.

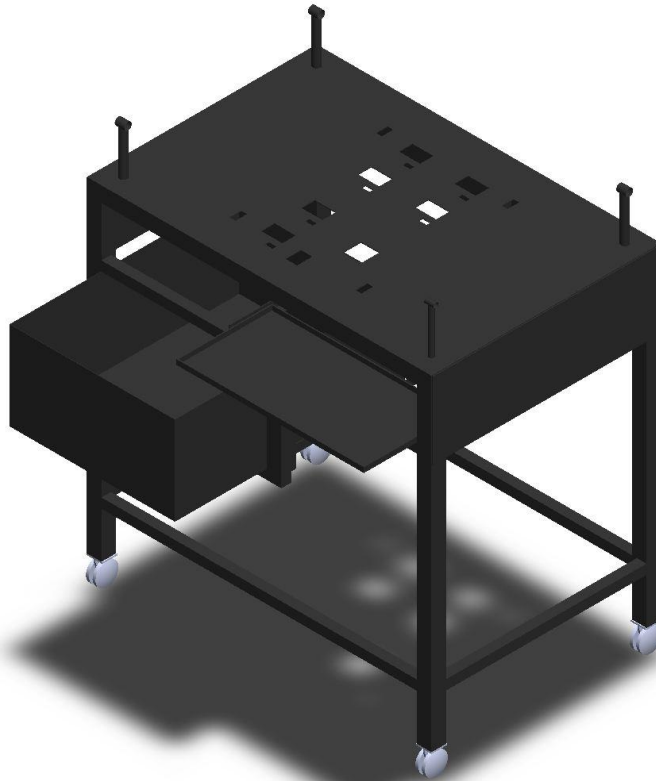
**Figura 23. Conexión Switches.**



**Fuente:** Autores de proyecto.

## 2.5. ESTRUCTURA

**Figura 24. Estructura banco de superficies extendidas.**



**Fuente:** Autores de proyecto

Es la encargada de soportar el peso y guardar todos los equipos y elementos que se compone el banco descritos anteriormente.

Esta estructura de la mesa fue dada en tubería cuadrada de 1½" con espesor de calibre 18 la longitud vertical de estas son de 90 cm, las patas de la estructura tienen como pivote una rueda de diámetro 6 mm, cada una de estas ruedas pueden soportar una carga de 50 Kg para un total de 200Kg de peso que pueda llegar a tener el banco, dos de estas ruedas están equipadas con freno para poder estabilizar el banco y realizar un respectivo laboratorio seguro.

Cuenta con tres tubos de ¾" y uno de ½" con ranuras soldados horizontalmente en las esquinas del mesón del banco para fijar fácilmente las aletas disipadoras de calor (como se ilustra en la figura 24) y así realizar las pruebas e intercambiar posiciones más cómodamente, un cajón de almacenamiento y un porta teclado con correderas para la toma de datos del laboratorio.

### 3. PRUEBAS Y DISEÑO DE LA PRACTICA DE LABORATORIO

Finalizados los procesos de diseño, fabricación, análisis y compra de los diferentes dispositivos que conforman el banco de pruebas de superficies extendidas, procedemos al ensamble y conexión de dichos dispositivos para dar por terminado el banco, continua la realización de diferentes pruebas cambiando la aleta disipadora de calor y registrando las temperaturas de base y punta de la aleta que nos registran los termómetros digitales durante un periodo de tiempo en el cual el disipador de calor nos muestre que llego a estabilizar su temperatura.

**Figura 25. Banco de superficies extendidas.**



**Fuente:** Autores de proyecto

### **3.1. PRUEBAS REALIZADAS**

Las pruebas realizadas en el banco consisten en colocar las diferentes tipos de aletas disipadoras de calor en las respectivas bases en posición horizontal y vertical; se registran cada dos minutos la temperatura de punta y base de la región central de cada uno de los disipadores, hasta encontrar que las temperaturas se estabilizan. Se realiza este procedimiento cuatro (4) veces a cada aleta disipadora de calor para obtener una mayor fiabilidad de los datos ( los datos registrados a continuación son promedios ponderados). Las pruebas se realizan sin y con control de temperatura de las resistencias generadoras de calor. El objetivo de las pruebas es encontrar el mejor posicionamiento de las aletas (horizontal o vertical) para el diseño final del banco, calcular los coeficientes de convección y realizar un análisis de: régimen transitorio y estable, perfiles de temperatura y configuración de aletas.

### **3.2. DATOS OBTENIDOS**

Se realizaron pruebas para ver el comportamiento en cuanto a disipación de calor, estado transitorio y estado estable, de las cuales sus promedios se muestran y se grafican a continuación, para cada una de las configuraciones:

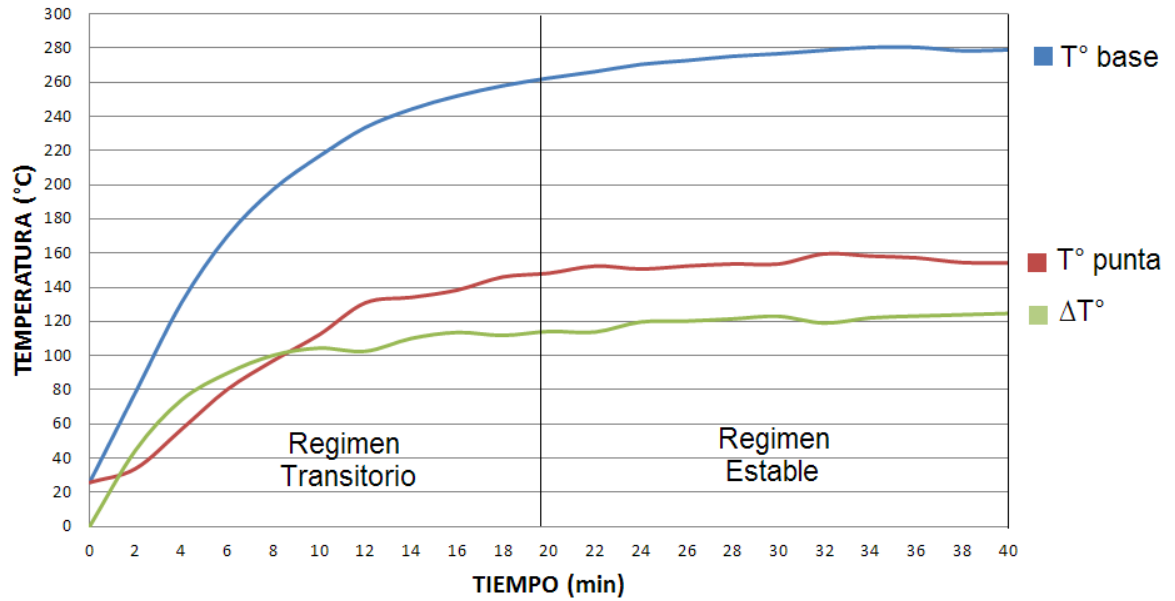
### 3.2.1. Aleta Anular Pequeña (radio=30 mm)

Tabla 6. Toma de datos aleta anular r=30.

TIEMPO	POSICIÓN VERTICAL			POSICIÓN HORIZONTAL		
	T°_base	T°_punta	$\Delta T$	T°_base	T°_punta	$\Delta T$
0	25,80	25,80	0	28,5	28,5	0
2	78,60	33,93	44,68	70,0	37,0	33,0
4	130,98	56,90	74,08	105,5	58,0	47,5
6	169,98	80,23	89,75	125,5	70,4	55,2
8	197,35	97,13	100,23	154,5	84,0	70,5
10	216,75	112,30	104,45	170,5	96,5	74,0
12	233,50	130,93	102,58	181,5	99,5	82,0
14	244,25	134,15	110,10	184,0	101,0	83,0
16	252,00	138,38	113,63	186,5	102,5	84,0
18	258,00	146,13	111,88	190,0	106,5	83,5
20	262,50	148,28	114,23	192,5	105,5	87,0
22	266,25	152,43	113,83	188,5	106,0	82,5
24	270,50	150,75	119,75	188,0	107,0	81,0
26	272,75	152,48	120,28	193,5	108,5	85,0
28	275,25	153,68	121,58	195,5	106,5	89,0
30	276,75	153,70	123,05	190,0	105,5	84,5
32	278,75	159,65	119,10	191,0	108,5	82,5
34	280,50	158,33	122,18	189,5	108,0	81,5
36	280,50	157,30	123,20	189,0	106,5	82,5
38	278,50	154,55	123,95	188,5	106,5	82,0
40	279,00	154,25	124,75	187,0	108,5	78,5

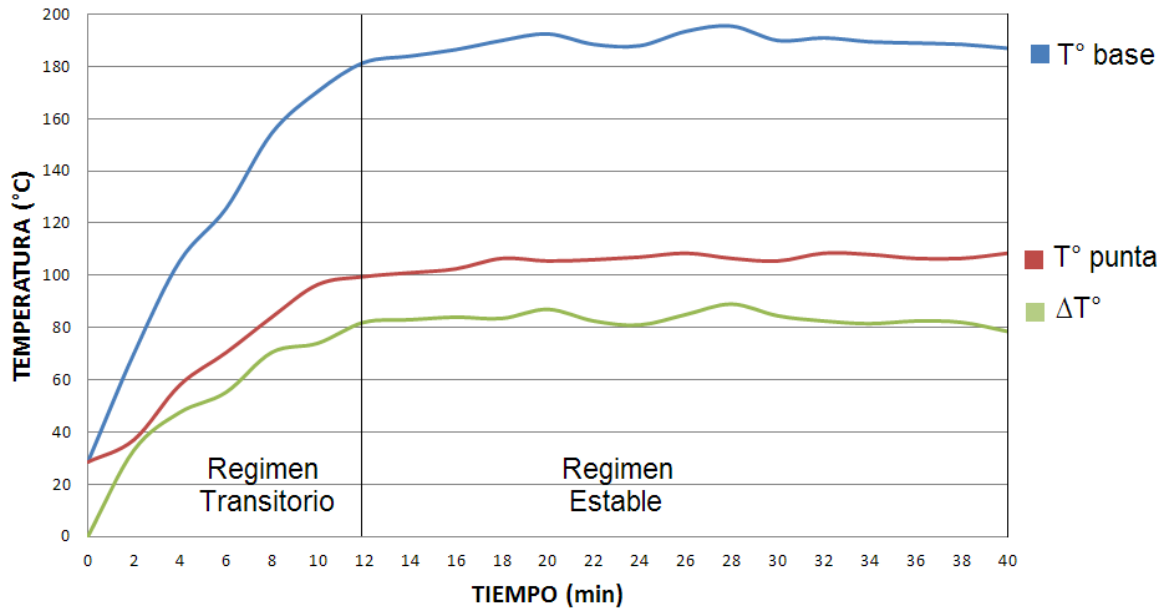
Fuente: Autores de proyecto.

**Figura 26. Temperatura vs tiempo aleta anular r=30, posición vertical.**



Fuente: Autores de proyecto

**Figura 27. Temperatura vs tiempo aleta anular r=30, posición horizontal.**



Fuente: Autores de proyecto

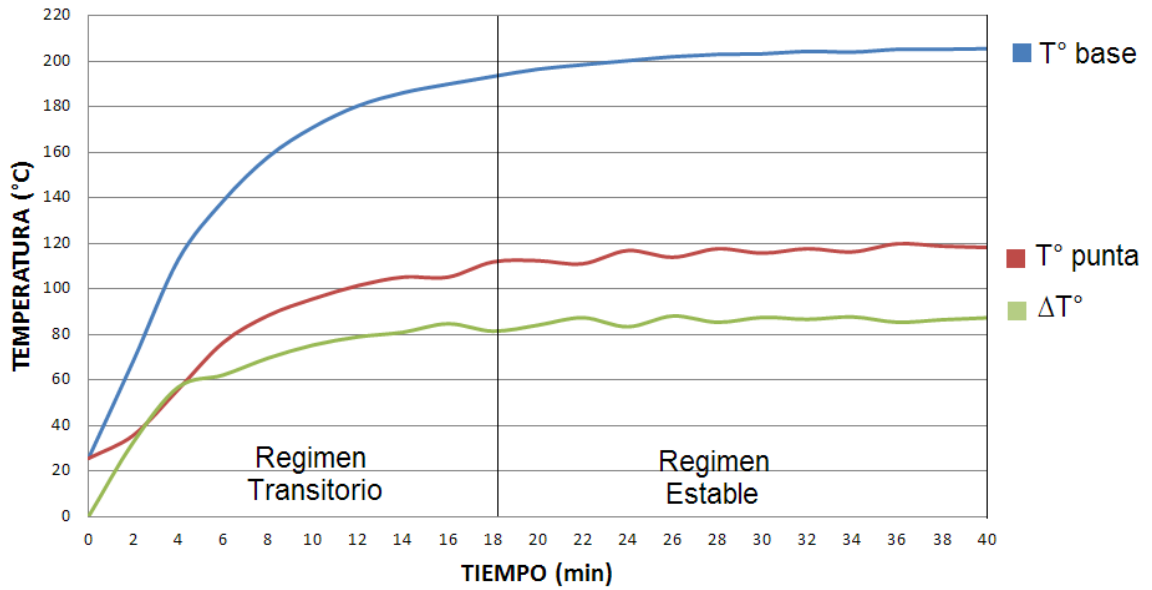
### 3.2.2. Aleta Longitudinal

Tabla 7. Toma de datos aleta longitudinal.

TIEMPO	POSICIÓN VERTICAL			POSICIÓN HORIZONTAL		
	T°_base	T°_punta	ΔT	T°_base	T°_punta	ΔT
0	25,63	25,63	0	28,0	28,0	0
2	68,48	35,75	32,73	59,35	36,9	22,5
4	112,85	55,95	56,90	88,75	55,0	33,8
6	138,70	76,50	62,20	111,0	76,6	34,4
8	158,00	88,35	69,65	131,5	89,5	42,0
10	171,03	95,68	75,35	143,5	104,0	39,5
12	180,43	101,48	78,95	157,5	110,5	47,0
14	186,18	105,20	80,98	164,5	118,5	46,0
16	189,93	105,20	84,73	170,5	121,5	49,0
18	193,33	111,88	81,45	176,0	128,0	48,0
20	196,50	112,40	84,10	177,0	130,0	47,0
22	198,45	111,08	87,38	176,5	130,0	46,5
24	200,25	116,85	83,40	175,0	130,0	45,0
26	202,00	113,90	88,10	176,5	131,5	45,0
28	203,00	117,65	85,35	178,5	128,5	50,0
30	203,25	115,73	87,53	179,5	132,0	47,5
32	204,35	117,68	86,68	179,0	130,5	48,5
34	204,00	116,28	87,73	180,0	131,0	49,0
36	205,25	119,85	85,40	180,5	131,5	49,0
38	205,25	118,78	86,48	182,0	133,0	49,0
40	205,50	118,20	87,30	182,5	134,5	48,0

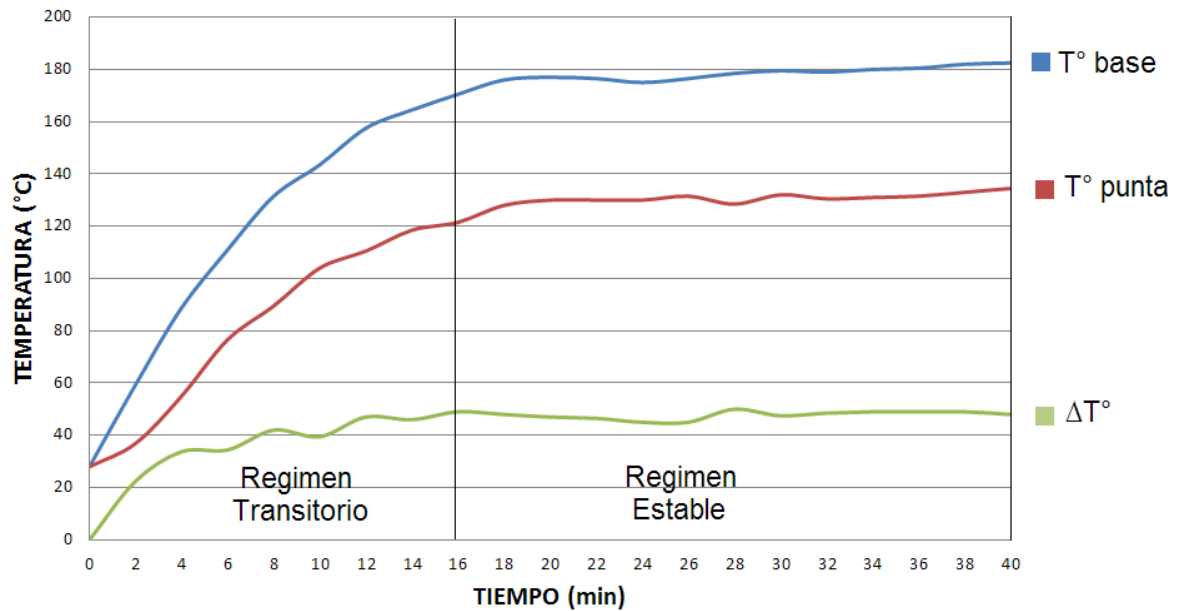
Fuente: Autores de proyecto.

**Figura 28. Temperatura vs tiempo aleta longitudinal, posición vertical.**



Fuente: Autores de proyecto

**Figura 29. Temperatura vs tiempo aleta longitudinal, posición horizontal.**



Fuente: Autores de proyecto

Ya que los resultados resultan repetitivos se anexan estos (anexo A) y se presenta a continuación un resumen de datos para todas las configuraciones.

Las curvas de comportamiento de temperatura contra tiempo (figuras 26, 27, 28, 29), presenta pequeñas oscilaciones debido a la variación de voltaje de entrada a el sistema generador de calor, provocando una potencia variable, tanto en el sistema sin control como con control (anexo A), debido a que las oscilaciones son causadas por la estructura de control PID.

### 3.3. RESUMEN DE DATOS

Cuando la temperatura llego al estado de estabilidad se ha sacado un promedio de la temperatura de la base y la temperatura de la punta, de cada una de las 7 configuraciones de aletas que tenemos en el banco tanto en posición horizontal como vertical, para ver de manera numérica cuál de estas tiene menor temperatura y así elegir para las practicas la posición más óptima de las aletas.

**Tabla 8. Resumen datos tomados.**

TIPO ALETA		POSICIÓN	T°_BASE	T°_PUNTA	$\Delta T$
ANULAR <sup>2</sup>	radio=30	VETRICAL	276,9	154,9	122,0
		HORIZONTAL	189,0	105,8	83,2
	radio=40	VETRICAL	246,3	127,0	119,3
		HORIZONTAL	178,5	84,2	94,3
	radio=50	VETRICAL	232,4	114,2	118,2
		HORIZONTAL	142,2	67,5	74,7
LONGITUDINAL		VETRICAL	203,1	114,6	88,5
		HORIZONTAL	178,6	130,9	47,7

<sup>2</sup> Unidades de longitud en milímetros.

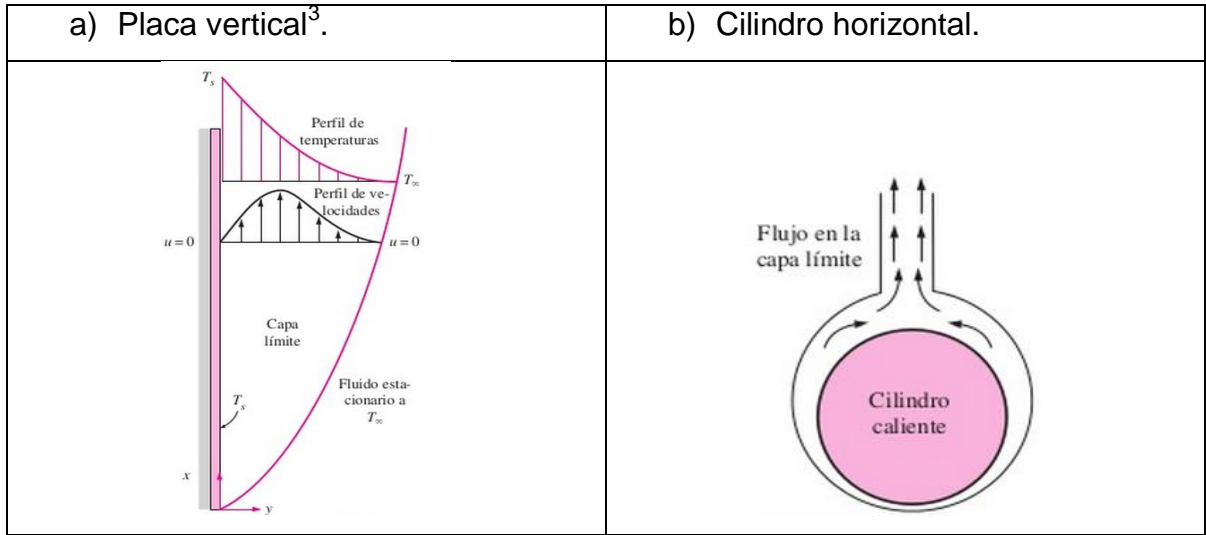
TIPO ALETA		POSICIÓN	T°_BASE	T°_PUNTA	$\Delta T$
AGUJAS	ACERO	VETRICAL	290,7	120,9	169,8
		HORIZONTAL	267,5	118,9	148,6
	ALUMINIO	VETRICAL	280,5	178,9	101,6
		HORIZONTAL	232,1	114,9	117,2
	BRONCE	VETRICAL	268,4	181,5	86,9
		HORIZONTAL	230,2	130,3	99,9

**Fuente:** Autores de proyecto.

De los datos obtenidos en la tabla 8, se visualiza que para todas las configuraciones de aletas la mejor posición en cuanto a disipación de calor, la encontramos en una posición horizontal, ya que sus bases permanecen más frías, debido al enfriamiento por convección natural. Este enfriamiento es eficiente horizontalmente ya que se encuentre más aire frío circundante alrededor de los diferentes disipadores en esta posición que verticalmente, debido a la diferencia de densidad provocada por el calentamiento del aire, la fuerza neta de empuje actúa así arriba calentando el aire que se encuentra en las capas superiores e aledañas, creando un mayor campo de aire caliente y como resultado, el aire más frío que está en la vecindad del cilindro vertical tendrá dificultad para llegar a este (ver figura 30).

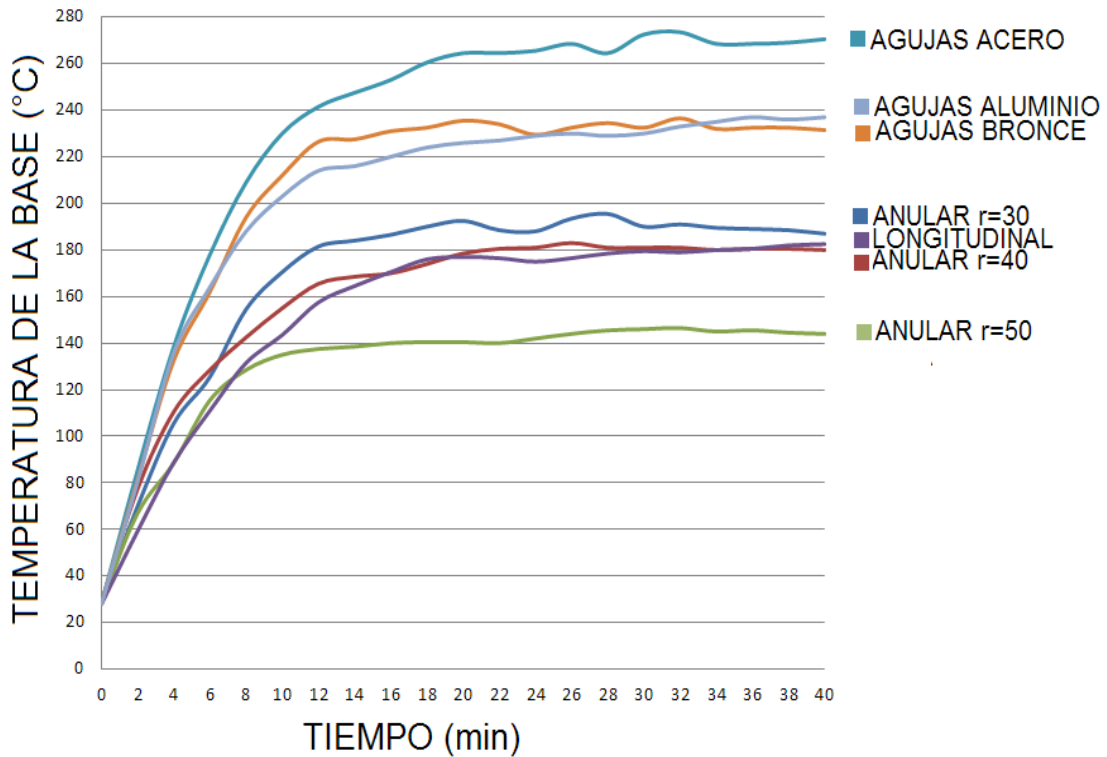
Sabiendo de ante mano que la mejor posición es la horizontal, se realizó las gráficas de las temperaturas base y punta, de todas las aletas en esta posición, para ver cuál de estas tienen mejor comportamiento a la estabilidad de la temperatura tanto en la base como en la punta de las aletas, como se ilustra en la figura 31 y figura 32.

**Figura 30. Flujos de calor modo vertical y horizontal.**



**Fuente:** Editado transferencia de calor cengel.

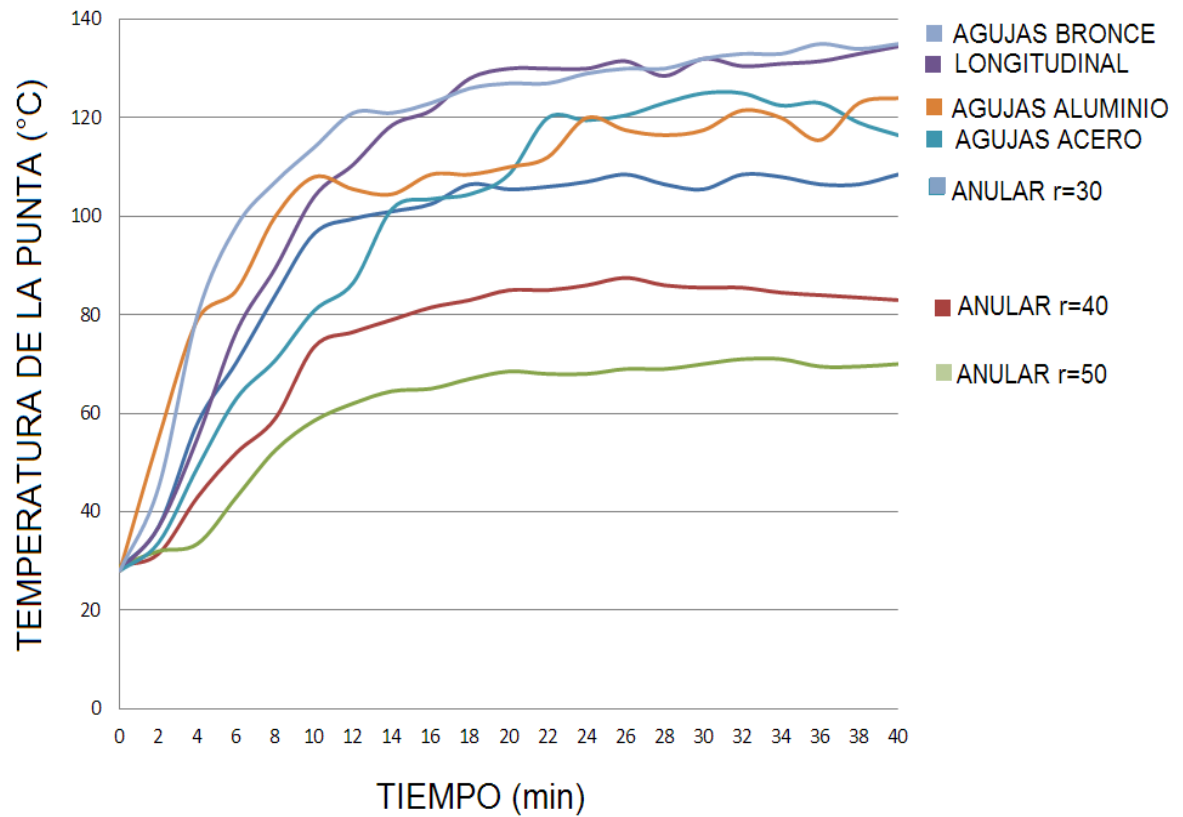
**Figura 31. Temperatura base vs tiempo de los diferentes disipadores.**



**Fuente:** Autores de proyecto

<sup>3</sup> Un cilindro vertical puede tratarse como placa vertical cuando:  $D \geq 35L/Gr_L^{1/4}$

**Figura 32. Temperatura de punta vs tiempo de los diferentes disipadores.**



**Fuente:** Autores de proyecto

Se determinó la distribución de temperaturas para la superficie uniforme (aleta longitudinal y aguja) con las ecuaciones de la tabla 2, tomando el caso a) y no uniforme (aleta anular) con las ecuaciones 24 del capítulo 1, en forma teórica asumiendo una conductividad térmica del material según la tabla A1 de Incropera.

A continuación se realizan cálculos tipos para el cálculo del coeficiente de convección y perfil de temperaturas. Conociendo las dimensiones de la aleta (ejemplo aleta longitudinal):

$W = 0.2$  [m] largo

$t = 0.003$  [m] espesor

$L = 0.03$  [m] ancho

Sabiendo del análisis de toma de datos las respectivas temperaturas en estado estable:

$$T_p = 130.9 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_b = 178.6 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{amb} = 28 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Tomando para  $X=L$ :

$$T_x = T_p$$

Se define:

$$\theta_T = T_x - T_{amb}$$

$$\theta_b = T_b - T_{amb}$$

Seleccionando de tablas la conductividad térmica de acero inoxidable AISI 304 a una temperatura media, en kelvin de:

$$T_M = \frac{T_b + T_{amb}}{2} = 376,3 \text{ kelvin} \quad (31)$$

Dando como resultado una  $K=16,936^4$ , y resolviendo la ecuación de distribución de temperatura con convección en el extremo, con los datos ya planteados mediante la ayuda del EES:

$$\frac{\theta_T}{\theta_b} = \frac{\cosh m L - X + \frac{h}{mk} \sinh(m L - X)}{\cosh ml + \frac{h}{mk} \sinh(ml)} \quad (32)$$

---

<sup>4</sup> Conductividad térmica tomada de tabla A1, Transferencia de Calor Incropera.

Dónde:

$$m^2 = \frac{hP_L}{kA_{cl}} \quad (33)$$

Se obtiene un coeficiente de convección:

$$h = 21.86 \frac{W}{m \cdot K}$$

Con el coeficiente de convección ya calculado, variamos la distancia  $x$ , desde cero a 3 centímetros (longitud de la aleta) en la ecuación 32, y se calcula las diferentes temperaturas a lo largo de la aleta, como se muestra a continuación:

**Tabla 9. Temperaturas a lo largo de la aleta longitudinal.**

X(m)	T <sub>x</sub> (°C)
0	178,6
0,00333	168,5
0,00667	157,7
0,01	152,2
0,01333	145,9
0,01667	140,8
0,02	136,8
0,02333	133,8
0,02667	131,9
0,03	130,9

**Fuente:** Autores de proyecto.

Para el cálculo de distribución de temperaturas de aleta de aguja se realiza el mismo procedimiento anterior.

Para la distribución de temperatura de las aletas anulares en sus diferentes radios se realiza el mismo procedimiento solo que la distribución de temperaturas de este tipo de aletas (no uniformes), se calcula mediante la siguiente ecuación:

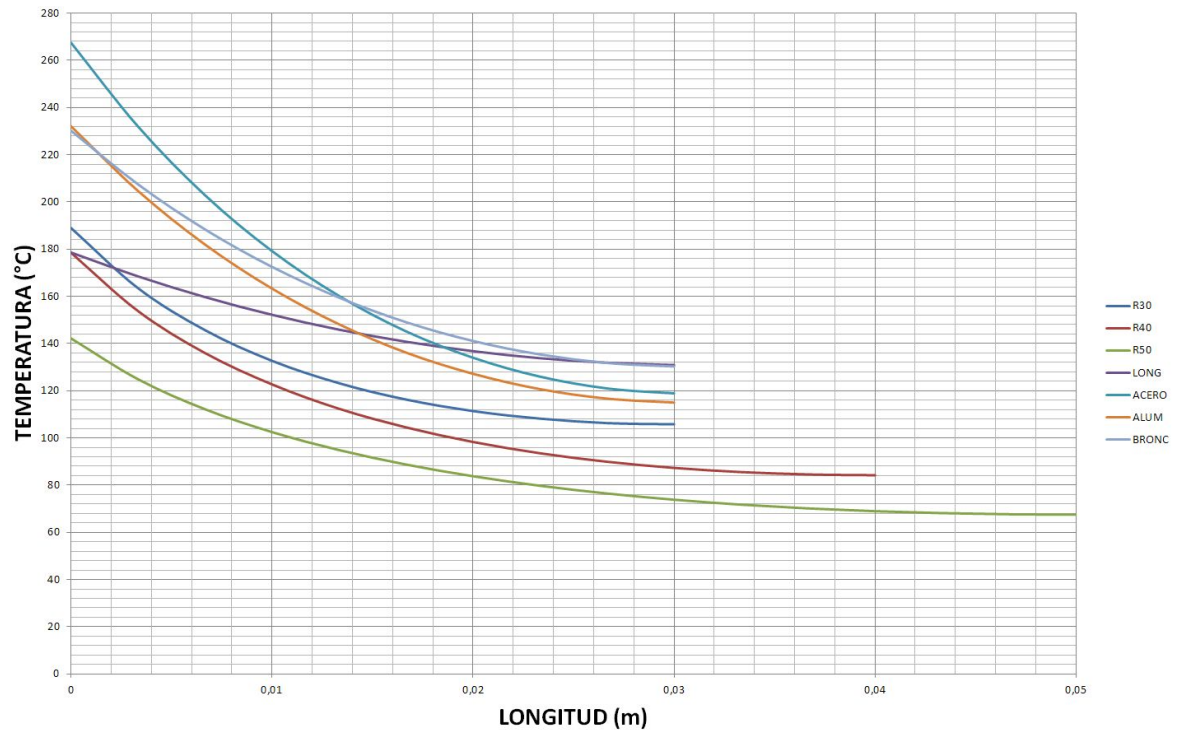
$$\frac{\theta_T}{\theta_b} = \frac{I_0 mr * k_1 mr_2 + k_0 mr * I_1(mr_2)}{I_0 mr_1 * k_1 mr_2 + k_0 mr_1 * I_1(mr_2)} \quad (34)$$

Dónde:

$$m^2 = \frac{2h}{kt} \quad (35)$$

A continuación se muestra la distribución de temperaturas de las diferentes aletas y materiales:

**Figura 33. Distribución de temperaturas diferentes disipadores.**



Fuente: Autores de proyecto.

### 3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se observa que la transferencia de calor de las aletas al ambiente varía de forma significativa debido a su direccionamiento, presentando una mayor transferencia de calor al ambiente en forma horizontal, debido a que el aire fluye de frío a caliente por diferencia de densidad causado por el calentamiento del mismo. En la posición horizontal las aletas encuentran mayor cantidad de aire frío en sus alrededores, ya que en vertical el aire caliente provoca una capa de aire que calienta a los alrededores. Por tal motivo se deja el diseño final en cuanto a posición de los disipadores en una posición horizontal.

De los disipadores de calor de agujas, el que presenta una mejor conductividad térmica del material es el bronce, ya que el cambio de temperatura entre base y punta es menor, seguido el aluminio y finalmente el acero inoxidable, estos presenta una incoherencia con las tablas de conductividad térmica de los materiales de incropera ya que debería ser el mejor el aluminio, bronce y acero inoxidable. Se realizó de nuevo otra toma de datos para corroborar lo anterior y siguió presentando los mismos resultados.

En los disipadores de calor anulares vemos que el cambio de temperatura entre base y punta de  $r=30$ ,  $r=40$  y  $r=50$  son coherentes en que a mayor radio menor es la temperatura de la base (ver figura 29 datos sin control). Para los datos tomados con control las aletas anulares presentaron los mismos resultados para  $r=30$  y  $r=40$ , pero para  $r=50$  no ocurrió una disipación mayor (ver anexo A-3), esto debido a que a bajas temperaturas la conducción no alcanza a ser relevante y la temperatura de la punta tiende a la del ambiente (ver sección 1.3.5).

Las aletas anulares presentan una estabilidad en un menor tiempo tanto en su base como en su punta como se ven en la figura 45 y figura 46, lo cual da un

estado transitorio corto, permitiendo en un caso dado de enfriamiento de un proceso, rápida estabilidad.

Para las aletas de agujas presenta una pérdida de calor baja respecto a las anulares y longitudinal (ver Figura 29) respecto a su base. En cuanto a la punta de la aleta tiene presente gran inestabilidad de la temperatura.

Las distribuciones de temperaturas de cada tipo de aleta (ver Figura 31) se evidencia el mejor comportamiento de las aletas anulares, y también se puede ver que al aumentar la longitud de la aleta tiende a estabilizarse y no hay un aumento en la transferencia de calor.

Se realizó pruebas a las diferentes configuraciones a una temperatura controlada mediante el pirómetro (ver anexo A) donde de su promedio se verifica el comportamiento de las aletas y los resultados obtenidos anteriormente.

### **3.5. DISEÑO DE LA PRACTICA DE LABORATORIO**

A continuación se indica la forma de realizar el laboratorio de superficies extendidas



**LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR**  
**ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

LABORATORIO DE SUPERFICIES EXTENDIDAS

FECHA:

GRUPO:

ELABORO:

REVISO:

### 1. OBJETIVOS

- Analizar el comportamiento de las aletas en régimen transitorio y estable.
- Verificar cual es la mejor configuración para la realizar la mayor transferencia de calor al ambiente en cuanto a: configuración, material y longitud de las aletas.
- Calcular los perfiles de temperaturas y coeficiente de transferencia de calor por convección conociendo la conductividad térmica de cada material.

### 2. MATERIALES

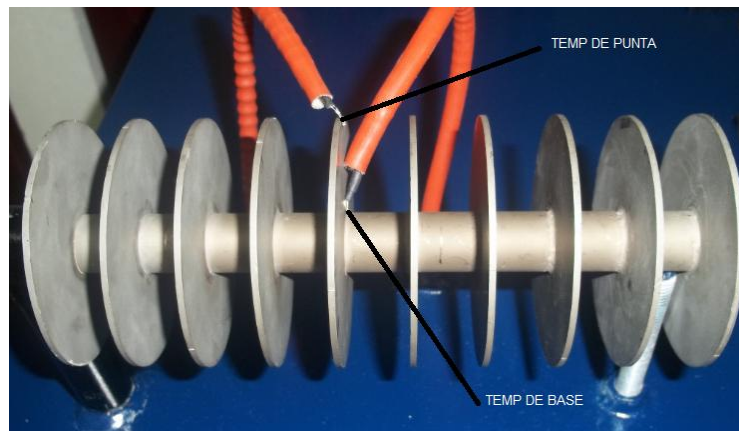
- Banco de pruebas de superficies extendidas.
- Cronometro, lápiz y papel.

### 3. PROCEDIMIENTO

- 1) Verifique que los switches del banco se encuentren en OFF.
- 2) Conecte a la red eléctrica el banco de superficies extendidas.
- 3) Colocar las aletas de diferente configuración y mismo material en posición horizontal en cada una de las posiciones diseñadas para tal fin junto con la resistencia, asegurándose de conectarlas bien y nivelarlas.

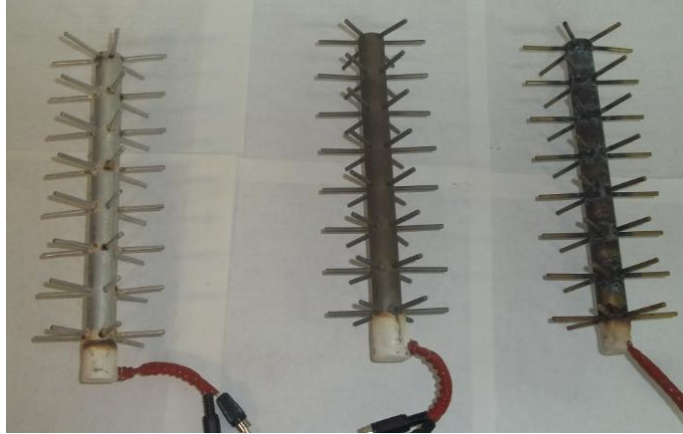


- 4) Colocar cada una de las termocuplas en la posición indicada a cada aleta y a la resistencia.

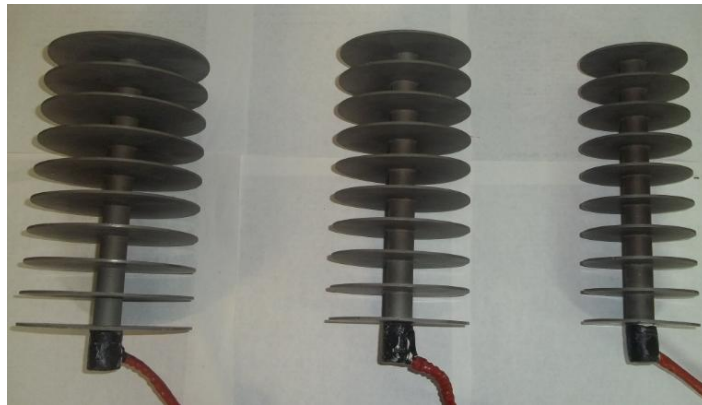


- 5) Encender los termómetros digitales, poner los switches de las aletas y el de la resistencia en ON seguido registrar el valor que indican los termómetros digitales como  $t=0$  (min).
- 6) Encender el banco esperar unos milisegundos para que el pirómetro sincronice y mande la señal, cuando los switches de las aletas y la resistencias indiquen el encendido accionar el cronometro y registrar las temperaturas indicadas por los termómetros digitales cada 20 segundos.
- 7) Registrar los datos hasta que estos indiquen una estabilidad, este tiempo de registro de datos depende de la temperatura seleccionada en el setpoint del pirómetro, a menor temperatura, mayor rapidez en estabilizar el sistema.
- 8) Apagar el banco de pruebas de superficies extendidas, quitar las aletas

y la resistencia, seguido conectar las de diferente material misma configuración, una resistencia que se encuentre a temperatura ambiente y seguir los pasos 4 al 7.



9) Realizar el paso anterior conectando las aletas misma configuración, mismo material diferente altura de aleta.



10) Apagar el banco de pruebas, desconectar y guardar, las aletas y resistencias usadas en las pruebas limpiarlo y ponerlo en su respectivo lugar.

#### 4. TABLA DE DATOS

t (seg)	Acero inoxidable						Agujas						Anular					
	Long		Anula		Aguja		Alumi		Bronc		Acero		r=30		r=40		r=50	
	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
b	p	b	p	b	p	T	T	b	p	b	p	b	p	b	p	b	p	
1	1	2	2	3	3	b1	p1	2	2	3	3	1	1	2	2	3	3	
0																		
15																		
30																		
60																		
75																		
:																		
n																		

#### 5. ECUACIONES A UTILIZAR.

Para el cálculo del coeficiente de convección y la distribución de temperaturas a lo largo de las aletas.

$$T_M = \frac{T_b + T_{amb}}{2} \quad (\text{Temperatura media para la selección de la conductividad térmica})$$

a) Para aletas longitudinal y de agujas.

$$\frac{\theta_T}{\theta_b} = \frac{\cosh m L - X + \frac{h}{mk} \sinh(m L - X)}{\cosh ml + \frac{h}{mk} \sinh(ml)}$$

Dónde:  $m^2 = \frac{hP_l}{kA_{cl}}$

b) para aletas anulares.

$$\frac{\theta_T}{\theta_b} = \frac{I_0 m r_1 * k_1 m r_2 + k_0 m r_1 * I_1(m r_2)}{I_0 m r_1 * k_1 m r_2 + k_0 m r_1 * I_1(m r_2)}$$

Dónde:  $m^2 = \frac{2h}{kt}$

### c) CONCLUSIONES


Después de la toma de datos de las diferentes configuraciones de aletas y materiales, calcular los diferentes coeficientes de convección (mostrado en los cálculos tipo), calcular y graficar la distribución de temperaturas, graficar temperatura de base contra tiempo. Finalmente realizar un análisis de cual es: el mejor material, configuración y longitud de aleta.

## CONCLUSIONES

- Se diseñó y se construyó un banco experimental para el análisis de la transferencia de calor en superficies extendidas (aletas).
- Para el desarrollo del presente trabajo de grado no solo fue de gran ayuda los conocimientos de transferencia de calor, también aplicamos los conocimientos adquiridos en otras áreas complementarias e importantes en la carrera de ingeniería mecánica.
- Las gráficas obtenidas al tener la resistencia a 350°C son similares a las obtenidas cuando controlamos la temperatura a 150°C, por tal motivo para agilizar la toma de datos se ha diseñado la práctica de laboratorio con control, con la cual se da mayor seguridad para los estudiantes al disminuir el riesgo a quemaduras graves.
- Debido a la forma que se coloquen los disipadores de calor es posible obtener mejores resultados en la transferencia de calor de estos al ambiente, es por tal motivo que hemos visto que al colocarlos horizontalmente los resultados fueron más óptimos.
- Se elaboró una práctica para el laboratorio de sistemas térmicos, cuyo objetivo el análisis de comportamiento térmico de las diferentes configuraciones, cálculo de los coeficientes de convección y distribución de temperaturas.

## BIBLIOGRAFÍA

- AUTONICS, Sensors & Controllers. Fecha de Consulta: Enero 12 de 2013.  
Disponibilidad y Acceso:  
[http://www.autonics.com/products/products\\_detail.php?catecode=02/01/01&db\\_uid=256](http://www.autonics.com/products/products_detail.php?catecode=02/01/01&db_uid=256).
- CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor. Editorial McGraw-Hill. México. Segunda edición 2004.
- F. MILLS. Transferencia de calor. Editorial IRWIN, primera edición 1995.
- HOLMAN, J.P. Transferencia de calor. Editorial McGraw-Hill. Madrid. Traducción de Octava edición 1998.
- INCROPERA, F y DE WITT, D. Fundamentos de transferencia de calor. Editorial Prentice Hall. México, Traducción de cuarta edición 1999.
- UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA. Fecha de Consulta: Mayo 17 de 2013.  
Disponibilidad y Acceso: <http://www.uanttof.cl/caim/ asignaturas/ transferencia>.

# **ANEXOS**

**Anexo A. Datos de las pruebas realizadas.**

Tiem (seg)	ALETA ANULAR						ALETA LONGITUDINAL		ALETA DE AGUJAS					
	Radio=30 mm		Radio=40 mm		Radio=50 mm				ACERO		ALUMINIO		BRONCE	
	T° base	T° punt	T° base	T° punt	T° base	T° punt	T° base	T° punt	T° base	T° punt	T° base	T° punt	T° base	T° punt
0	27,28	27,28	27,28	27,28	27,03	27,03	25,63	25,63	27,03	27,03	26,98	27,05	27,63	27,63
2	84,25	30,75	84,25	30,75	82,75	30,45	68,48	35,75	94,93	37,85	90,95	68,75	88,35	62,18
4	128,00	51,00	128,00	51,00	128,30	41,15	112,85	55,95	160,30	63,20	161,75	116,78	134,53	103,28
6	162,00	65,25	162,00	65,25	156,25	56,30	138,70	76,50	206,75	83,75	205,50	144,50	169,75	126,58
8	184,50	79,00	184,50	79,00	176,00	70,00	158,00	88,35	239,75	101,05	225,25	163,10	187,00	141,25
10	200,50	92,50	200,50	92,50	189,03	80,70	171,03	95,68	256,80	106,95	245,50	175,25	211,75	151,08
12	208,50	99,25	208,50	99,25	202,18	90,03	180,43	101,48	274,00	113,88	255,50	177,75	226,00	159,50
14	221,00	102,50	221,00	102,50	209,90	97,05	186,18	105,20	285,25	116,48	260,25	181,00	237,50	164,75
16	228,25	110,00	228,25	110,00	216,00	102,48	189,93	105,20	288,75	118,38	263,00	181,00	243,75	167,25
18	234,00	115,75	234,00	115,75	221,00	107,55	193,33	111,88	295,25	118,48	274,75	180,50	252,50	171,50
20	234,25	116,25	234,25	116,25	225,75	108,43	196,50	112,40	292,00	119,90	273,50	183,75	259,50	171,75
22	238,00	118,50	238,00	118,50	227,25	108,05	198,45	111,08	293,00	121,95	277,00	175,48	261,50	177,00
24	242,50	123,00	242,50	123,00	231,00	114,45	200,25	116,85	292,00	117,55	281,25	178,75	261,50	178,68
26	242,75	123,50	242,75	123,50	232,00	115,78	202,00	113,90	290,00	127,23	282,00	181,88	265,25	175,50
28	242,25	124,25	242,25	124,25	233,50	116,15	203,00	117,65	294,25	123,15	281,75	182,25	264,25	176,25
30	247,00	125,00	247,00	125,00	237,25	117,73	203,25	115,73	295,00	125,30	283,75	178,45	269,50	183,00
32	246,50	126,75	246,50	126,75	234,50	112,48	204,35	117,68	293,75	122,88	283,50	178,25	272,75	182,00
34	246,75	127,50	246,75	127,50	236,25	117,63	204,00	116,28	291,50	124,75	282,50	179,75	271,25	184,25
36	248,00	130,00	248,00	130,00	237,00	118,38	205,25	119,85	291,75	123,58	279,75	174,75	271,00	184,75
38	250,00	131,00	250,00	131,00	236,50	117,53	205,25	118,78	294,75	119,90	284,50	176,93	273,50	187,25
40	250,50	132,00	250,50	132,00	236,50	115,68	205,50	118,20	289,50	121,43	282,25	176,25	273,25	186,50

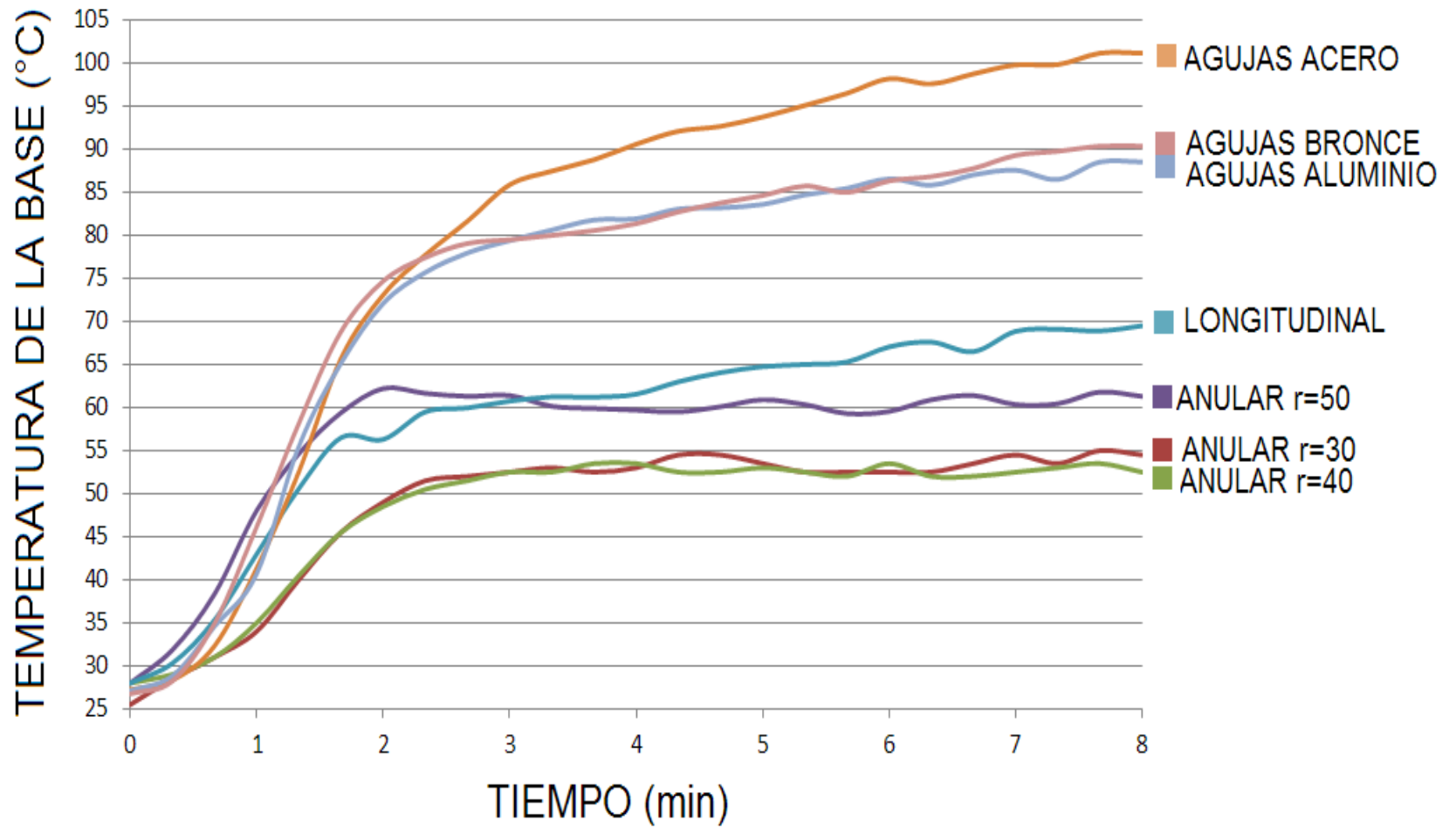
**Anexo A-1.** Toma de datos sin control de temperatura posición vertical.

tiemp (min)	ALETA ANULAR						ALETA LONGITUDINAL		ALETA DE AGUJAS					
	Radio=30 mm		Radio=40 mm		Radio=50 mm		T° base	T° punt	ACERO		ALUMINIO		BRONCE	
	T° base	T° punt	T° base	T° punt	T° base	T° punt			T° base	T° punt	T° base	T° punt	T° base	T° punt
0	28,5	28,5	29,0	29,0	29,0	29,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0
2	70,0	37,0	77,5	31,5	67,0	32,0	59,4	36,9	85,5	33,8	81,5	55,0	80,6	45,0
4	105,5	58,0	110,5	43,0	88,5	33,5	88,8	55,0	138,5	49,0	132,5	79,0	135,8	80,0
6	125,5	70,4	128,5	52,0	115,5	43,0	111,0	76,6	178,0	63,0	162,0	85,0	164,0	98,0
8	154,5	84,0	142,5	59,0	128,5	52,5	131,5	89,5	209,0	70,8	194,0	100,0	188,0	107,0
10	170,5	96,5	155,0	73,5	135,0	58,5	143,5	104,0	230,0	80,9	212,0	108,0	203,0	114,0
12	181,5	99,5	165,5	76,5	137,5	62,0	157,5	110,5	241,5	86,5	226,5	105,5	214,0	121,0
14	184,0	101,0	168,5	79,0	138,5	64,5	164,5	118,5	247,5	101,5	227,5	104,5	216,0	121,0
16	186,5	102,5	170,0	81,5	140,0	65,0	170,5	121,5	253,0	103,5	231,0	108,5	220,0	123,0
18	190,0	106,5	174,0	83,0	140,5	67,0	176,0	128,0	260,5	104,5	232,5	108,5	224,0	126,0
20	192,5	105,5	178,5	85,0	140,5	68,5	177,0	130,0	264,5	108,5	235,5	110,0	226,0	127,0
22	188,5	106,0	180,5	85,0	140,0	68,0	176,5	130,0	264,5	120,0	234,0	112,0	227,0	127,0
24	188,0	107,0	181,0	86,0	142,0	68,0	175,0	130,0	265,5	119,5	229,5	120,0	229,0	129,0
26	193,5	108,5	183,0	87,5	144,0	69,0	176,5	131,5	268,5	120,5	232,5	117,5	230,0	130,0
28	195,5	106,5	181,0	86,0	145,5	69,0	178,5	128,5	264,5	123,0	234,5	116,5	229,0	130,0
30	190,0	105,5	181,0	85,5	146,0	70,0	179,5	132,0	272,5	125,0	232,5	117,5	230,0	132,0
32	191,0	108,5	181,0	85,5	146,5	71,0	179,0	130,5	273,5	125,0	236,5	121,5	233,0	133,0
34	189,5	108,0	180,0	84,5	145,0	71,0	180,0	131,0	268,5	122,5	232,0	120,0	235,0	133,0
36	189,0	106,5	180,5	84,0	145,5	69,5	180,5	131,5	268,5	123,0	232,5	115,5	237,0	135,0
38	188,5	106,5	180,5	83,5	144,5	69,5	182,0	133,0	269,0	119,0	232,5	123,0	236,0	134,0
40	187,0	108,5	180,0	83,0	144,0	70,0	182,5	134,5	270,5	116,5	231,5	124,0	237,0	135,0

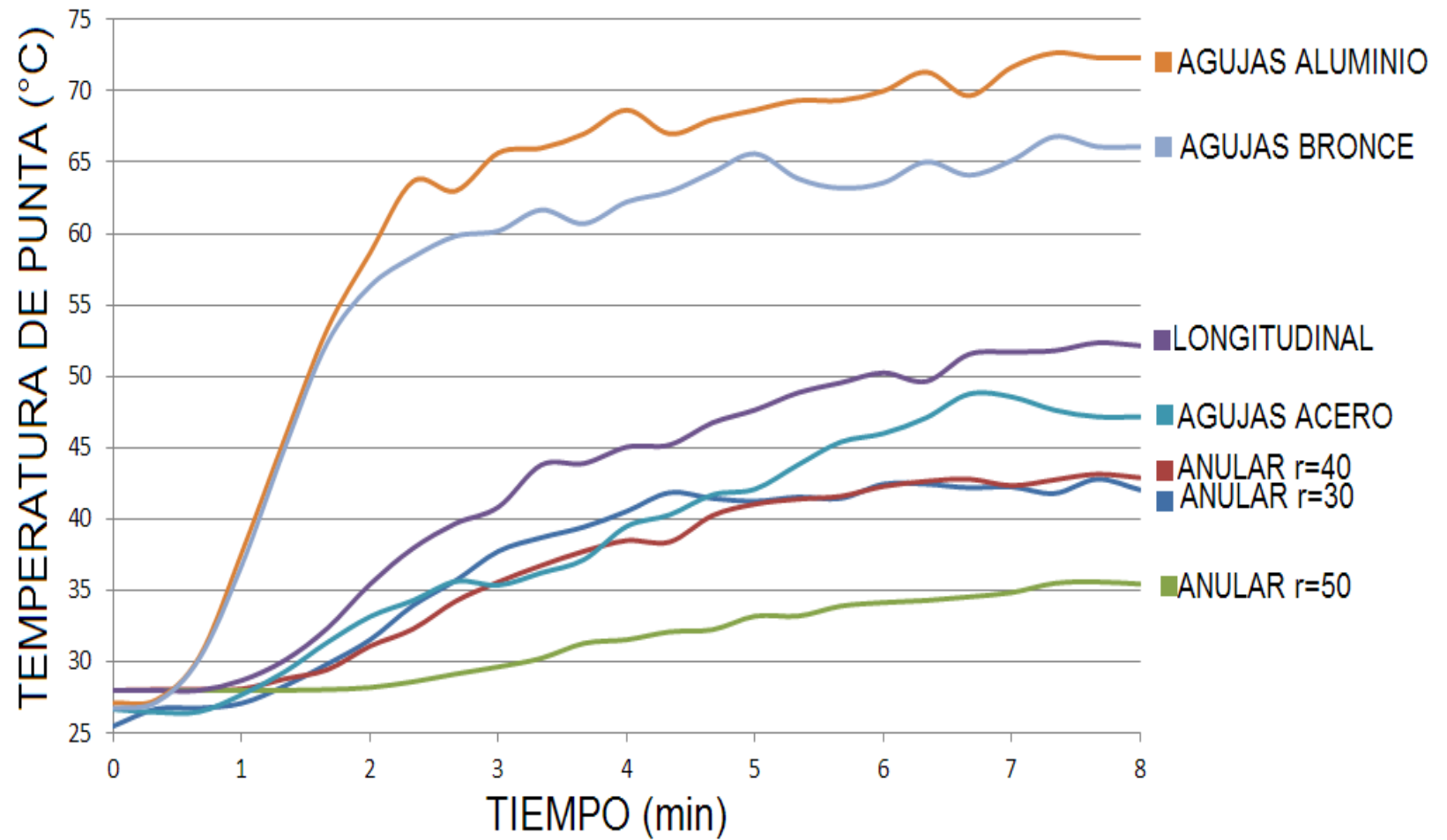
**Anexo A-2.** Toma de datos sin control de temperatura posición horizontal.

tiempo (seg)	T° resist	ALETA ANULAR						ALETA LONGITUDINAL		ALETA DE AGUJAS					
		R=30		R=40		R=50		T° base	T° punta	ACERO		ALUMINIO		BRONCE	
		T° base	T° punta	T° base	T° punta	T° base	T° punta			T° base	T° punta	T° base	T° punta	T° base	T° punta
0	27	25,5	25,5	28	28	28	28	28	28	27,2	26,7	27,1	27,1	26,7	26,7
20	34	28,5	26,7	29	28,05	31,85	28	30,3	28	28,3	26,5	28,8	27,3	28,2	27,2
40	60	31	26,75	31	28,05	38,35	28	35,35	28	32,3	26,5	34,6	30,3	35,0	30,2
60	91	34	27,1	35	28,1	48,05	28	43	28,7	41,4	27,7	40,7	37,7	46,2	36,8
80	120	40	28,3	40,5	28,8	54,65	28	50,6	30,1	52,6	29,3	55,5	45,7	58,2	44,9
100	143	45,5	29,85	45,5	29,45	59,4	28,05	56,5	32,35	65,7	31,4	65,2	53,3	68,8	52,4
120	158	49	31,55	48,5	31,1	62,2	28,2	56,3	35,45	73,1	32,7	72,1	58,7	74,7	56,3
140	153	51,5	33,95	50,5	32,3	61,65	28,6	59,5	37,95	77,7	34,3	75,7	63,7	77,4	58,4
160	148	52	35,7	51,5	34,25	61,3	29,15	59,95	39,7	81,7	35,6	78,0	63,0	79,1	59,8
180	149	52,5	37,75	52,5	35,6	61,4	29,65	60,75	40,85	85,9	35,4	79,4	65,7	79,5	60,2
200	151	53	38,7	52,5	36,75	60,15	30,25	61,25	43,8	87,5	36,2	80,6	66,0	80,0	61,7
220	152	52,5	39,45	53,5	37,75	59,9	31,3	61,2	43,9	88,8	37,2	81,8	67,0	80,6	60,7
240	148	53	40,55	53,5	38,5	59,7	31,55	61,55	45,05	90,6	37,9	81,9	68,7	81,4	62,2
260	150	54,5	41,85	52,5	38,4	59,5	32,1	63	45,2	92,1	38,4	83,1	67,0	82,7	62,9
280	154	54,5	41,45	52,5	40,25	60,1	32,25	64,05	46,75	92,7	39,9	83,2	68,0	83,8	64,3
300	151	53,5	41,25	53	41,05	60,9	33,2	64,75	47,65	93,8	40,8	83,6	68,7	84,6	65,6
320	149	52,5	41,55	52,5	41,4	60,35	33,2	65	48,85	95,1	41,9	84,7	69,3	85,7	63,9
340	150	52,5	41,45	52	41,6	59,3	33,9	65,3	49,55	96,5	43,8	85,5	69,3	85,0	63,2
360	152	52,5	42,45	53,5	42,3	59,55	34,15	67,05	50,25	98,2	44,1	86,6	70,0	86,3	63,6
380	148	52,5	42,45	52	42,65	60,9	34,3	67,6	49,65	97,6	45,1	85,8	71,3	86,8	65,0
400	153	53,5	42,2	52	42,8	61,4	34,55	66,5	51,55	98,8	48,8	87,0	69,7	87,8	64,1
420	150	54,5	42,25	52,5	42,35	60,35	34,85	68,85	51,7	99,8	48,6	87,6	71,7	89,3	65,1
440	147	53,5	41,8	53	42,75	60,45	35,5	69,1	51,8	99,8	47,6	86,5	72,7	89,8	66,8
460	150	55	42,8	53,5	43,15	61,8	35,6	68,9	52,35	101,2	47,2	88,5	72,3	90,4	66,1
480	153	54,5	42,05	52,5	42,9	61,3	35,45	69,5	52,15	101,2	47,2	88,5	72,3	90,4	66,1

Anexo A-3. Toma de datos con control de temperatura posición horizontal a 150°C resistencia eléctrica.



Anexo A-4. Grafica temperatura de base contra tiempo, posición horizontal a 150°C resistencia eléctrica.



## Anexo B. Tabla de propiedades materiales sólidos.

Propiedades de metales sólidos

Composición	Punto de fusión, K	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K), $k(\text{W/m} \cdot \text{K})/c_p(\text{J/kg} \cdot \text{K})$					
		$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$C_p$ J/kg · K	$k$ W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m <sup>2</sup> /s	100	200	400	600	800	1 000
<b>Aluminio:</b>											
Puro	933	2 702	903	237	97.1	302	237	240	231	218	
						482	798	949	1 033	1 146	
Aleación 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2 770	875	177	73.0	65	163	186	186		
						473	787	925	1 042		
Aleación 195, fundido (4.5% Cu)		2 790	883	168	68.2			174	185		
Berilio	1 550	1 850	1 825	200	59.2	990	301	161	126	106	90.8
						203	1 114	2 191	2 604	2 823	3 018
Bismuto	545	9 780	122	7.86	6.59	16.5	9.69	7.04			
						112	120	127			
Boro	2 573	2 500	1 107	27.0	9.76	190	55.5	16.8	10.6	9.60	9.85
						128	600	1 463	1 892	2 160	2 338
Cadmio	594	8 650	231	96.8	48.4	203	99.3	94.7			
						198	222	242			
Cromo	2 118	7 160	449	93.7	29.1	159	111	90.9	80.7	71.3	65.4
						192	384	484	542	581	616
Cobalto	1 769	8 862	421	99.2	26.6	167	122	85.4	67.4	58.2	52.1
						236	379	450	503	550	628
<b>Cobre:</b>											
Puro	1 358	8 933	385	401	117	482	413	393	379	366	352
						252	356	397	417	433	451
Bronce comercial (90% Cu, 10% Al)	1 293	8 800	420	52	14		42	52	59		
							785	160	545		
Bronce al fósforo para engranes (89% Cu, 11% Sn)	1 104	8 780	355	54	17		41	65	74		
							—	—	—		
Latón para cartuchos (70% Cu, 30% Zn)	1 188	8 530	380	110	33.9	75	95	137	149		
							360	395	425		
Constantán (55% Cu, 45% Ni)	1 493	8 920	384	23	6.71	17	19				
						237	362				
Germanio	1 211	5 360	322	59.9	34.7	232	96.8	43.2	27.3	19.8	17.4
						190	290	337	348	357	375
Oro	1 336	19 300	129	317	127	327	323	311	298	284	270
						109	124	131	135	140	145
Iridio	2 720	22 500	130	147	50.3	172	153	144	138	132	126
						90	122	133	138	144	153
<b>Hierro:</b>											
Puro	1 810	7 870	447	80.2	23.1	134	94.0	69.5	54.7	43.3	32.8
						216	384	490	574	680	975
Armco (99.75% puro)		7 870	447	72.7	20.7	95.6	80.6	65.7	53.1	42.2	32.3
						215	384	490	574	680	975
<b>Aceros al carbono:</b>											
Simple al carbono (Mn ≤ 1%, Si ≤ 0.1%)		7 854	434	60.5	17.7			56.7	48.0	39.2	30.0
								487	559	685	1 169
AISI 1010		7 832	434	63.9	18.8			58.7	48.8	39.2	31.3
								487	559	685	1 168
Al carbono-silicio (Mn ≤ 1%, 0.1% < Si ≤ 0.6%)		7 817	446	51.9	14.9			49.8	44.0	37.4	29.3
								501	582	699	971

Composición	Punto de fusión, K	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K), k(W/m · K)/c <sub>p</sub> (J/kg · K)					
		$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ J/kg · K	$k$ W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m <sup>2</sup> /s	100	200	400	600	800	1 000
		Al carbono-manganeso-silicio (1% < Mn < 1.65% 0.1% < Si < 0.6%)	8 131	434	41.0	11.6			42.2	39.7	35.0
							487	559	685	1 090	
Aceros al cromo (bajo): $\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{1}{4}$ Mo-Si (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)	7 822	444	37.7	10.9			38.2	36.7	33.3	26.9	
							492	575	688	969	
1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)	7 858	442	42.3	12.2			42.0	39.1	34.5	27.4	
							492	575	688	969	
1Cr-V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)	7 836	443	48.9	14.1			46.8	42.1	36.3	28.2	
							492	575	688	969	
Aceros inoxidables:											
AISI 302		8 055	480	15.1	3.91			17.3	20.0	22.8	25.4
								512	559	585	606
AISI 304	1 670	7 900	477	14.9	3.95	9.2	12.6	16.6	19.8	22.6	25.4
						272	402	515	557	582	611
AISI 316		8 238	468	13.4	3.48			15.2	18.3	21.3	24.2
								504	550	576	602
AISI 347		7 978	480	14.2	3.71			15.8	18.9	21.9	24.7
								513	559	585	606
Plomo	601	11 340	129	35.3	24.1	39.7	36.7	34.0	31.4		
						118	125	132	142		
Magnesio	923	1 740	1 024	156	87.6	169	159	153	149	146	
						649	934	1 074	1 170	1 267	
Molibdeno	2 894	10 240	251	138	53.7	179	143	134	126	118	112
						141	224	261	275	285	295
Níquel:											
Puro	1 728	8 900	444	90.7	23.0	164	107	80.2	65.6	67.6	71.8
						232	383	485	592	530	562
Nicromo (80% Ni, 20% Cr)	1 672	8 400	420	12	3.4			14	16	21	
								480	525	545	
Inconel X-750 (73% Ni, 15% Cr, 6.7% Fe)	1 665	8 510	439	11.7	3.1	8.7	10.3	13.5	17.0	20.5	24.0
						—	372	473	510	546	626
Niobio	2 741	8 570	265	53.7	23.6	55.2	52.6	55.2	58.2	61.3	64.4
						188	249	274	283	292	301
Paladio	1 827	12 020	244	71.8	24.5	76.5	71.6	73.6	79.7	86.9	94.2
						168	227	251	261	271	281
Platino:											
Puro	2 045	21 450	133	71.6	25.1	77.5	72.6	71.8	73.2	75.6	78.7
						100	125	136	141	146	152
Aleación 60Pt-40Rh (60% Pt, 40% Rh)	1 800	16 630	162	47	17.4			52	59	65	69
								—	—	—	—
Renio	3 453	21 100	136	47.9	16.7	58.9	51.0	46.1	44.2	44.1	44.6
						97	127	139	145	151	156