



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA UNIDAD PARA LA MEDICIÓN DE  
COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN  
INTERNA FORZADA EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS**

**Karen Noelia Hernández Avila**

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, noviembre de 2016



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA UNIDAD PARA LA MEDICIÓN DE  
COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN  
INTERNA FORZADA EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**KAREN NOELIA HERNÁNDEZ AVILA**  
ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordoñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

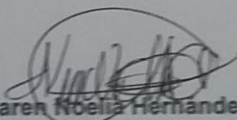


**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA UNIDAD PARA LA MEDICIÓN DE  
COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN  
INTERNA FORZADA EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 28 de noviembre de 2014.

  
Karen Noelia Hernández Avila







**FIUSAC**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, zona 12, Guatemala, Centroamérica

Guatemala 14 de septiembre de 2016

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
Director  
Escuela de ingeniería química  
Presente

Reciba un cordial saludo y que sus actividades se realicen en forma satisfactoria.

Por medio de la presente, le comunico que he trabajado con la estudiante: Karen Noelia Hernández Avila, que se identifica con el número de carné: 200815372, y **apruebo** en calidad de asesor el informe final de trabajo de graduación titulado: **"Diseño e implementación de una unidad para la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor por convección interna forzada en el laboratorio de operaciones unitarias"**.

Sin otro particular, agradeciendo su atención a la presente, me despido.

Atentamente.

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus  
INGENIERO QUÍMICO  
Colegiado 874

**Ingeniero Jorge Emilio Godínez Lemus**

Asesor Trabajo de Graduación

GRAMA DE INGENIERÍA  
QUÍMICA ACREDITADO POR  
Agencia Centroamericana de Acreditación de  
ramas de Arquitectura y de Ingeniería  
desde 2009 - 2012



**ACAAI**

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería

Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1950





Guatemala, 18 de octubre de 2016.  
Ref. EIQ.TG-IF.061.2016.

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo 085-2014 le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Solicitado por la estudiante universitaria: **Karen Noelia Hernández Avila.**  
Identificada con número de carné: **2008-15372.**  
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA.**

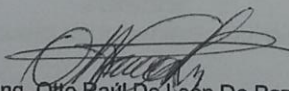
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA UNIDAD PARA LA MEDICIÓN DE  
COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR  
CONVECCIÓN INTERNA FORZADA EN EL LABORATORIO DE  
OPERACIONES UNITARIAS**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Emilio Godínez Lemus.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Otto Raúl De León De Paz  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo







Ref.EIQ.TG.066.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **KAREN NOELIA HERNÁNDEZ AVILA** titulado: **"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA UNIDAD PARA LA MEDICIÓN DE COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN INTERNA FORZADA EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
Director  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, noviembre 2016

Cc: Archivo  
CSWD/ale





Universidad de San Carlos  
de Guatemala

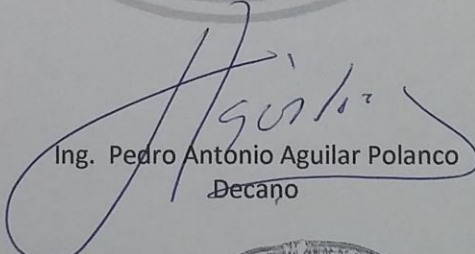


Facultad de Ingeniería  
Decanato

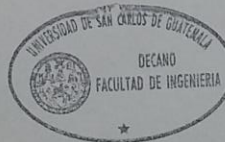
DTG. 541.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA UNIDAD PARA LA MEDICIÓN DE COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN INTERNA FORZADA EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS**, presentado por la estudiante universitaria: **Karen Noelia Hernández Avila**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, noviembre de 2016



/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser mi guía en los momentos más difíciles, y llenar mi vida de bendiciones.
- Mis padres** Irma Yolanda Avila y Guillermo Enrique Hernández, por su amor, paciencia y apoyo constante durante toda la carrera.
- Mis hermanos** Guisela, Sergio, David, Cynthia y Guillermo Hernández Avila, por su ayuda y comprensión durante este proceso.
- Mis sobrinos** Brandon Osoy y Paula Inés Ruiz, por ser mi felicidad, mi deseo de superación, y ser un ejemplo para ellos.
- Javier Godoy** Por todo su apoyo durante el final de mi carrera y el amor incondicional que me ha brindado.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por darme fuerza y sabiduría para llegar a culminar este sueño.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Lugar bendecido por Dios.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser parte importante de mi formación profesional
<b>Hermanos espirituales</b>	Por el apoyo incondicional brindado durante toda mi carrera.
<b>Mis padres</b>	Por haber realizado el mayor esfuerzo y sacarme adelante en esta etapa de mi vida.
<b>Ingeniero Jorge Godínez</b>	Por ser mi asesor para la elaboración de mi informe final y un gran amigo.
<b>Mis amigos</b>	Mauricio Rivera y Jesiel Enríquez, por guiarme en la implementación de mi equipo.
<b>Luis Miguel Rosales</b>	Por ser una gran ayuda y parte esencial en la implementación del nuevo equipo.

**Familia Godoy**

Por el apoyo durante estos últimos años de  
carrera.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
Hipótesis .....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	XV
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Justificación .....	2
1.2. Determinación del problema .....	3
1.2.1. Definición .....	4
1.2.2. Delimitación.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Transferencia de calor .....	5
2.2. Mecanismos de transferencia de calor .....	6
2.2.1. Conducción .....	6
2.2.1.1. Transferencia de calor por conducción .....	6
2.2.1.2. Conductividad térmica .....	8
2.2.1.3. Conductividad térmica en gases.....	8
2.2.1.4. Conducción de calor en paredes cilíndricas.....	9
2.2.2. Radiación .....	10

2.2.3.	Convección .....	10
2.2.3.1.	Convección natural.....	11
2.2.3.2.	Convección forzada.....	11
2.2.3.3.	Transferencia de calor por convección .....	11
2.2.3.4.	Coefficiente de transferencia de calor por convección .....	13
2.3.	Calor específico.....	15
2.4.	Número de Nusselt.....	15
2.5.	Número de Prandtl .....	16
2.6.	Número de Reynolds.....	17
2.7.	Flujo laminar en tubos .....	18
2.7.1.	Desarrollo de flujo laminar en la región de entrada.....	19
2.8.	Flujo turbulento en tubos .....	20
2.9.	Ecuación de Dittus-Boelter, Sieder y Tate, y Gnielinski para flujo turbulento .....	20
2.10.	Ventiladores.....	22
2.10.1.	Clasificación de los ventiladores .....	22
3.	METODOLOGÍA .....	25
3.1.	Variables.....	25
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	26
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	26
3.4.	Recursos materiales.....	26
4.	RESULTADOS.....	29
4.1.	Diseño e implementación del equipo de medición de coeficientes individuales de transferencia de calor .....	29
4.2.	Instructivo de realización de práctica .....	33

4.2.1.	Objetivo general.....	33
4.2.2.	Objetivos específicos.....	33
4.2.3.	Metolodogía de utilización del equipo.....	35
4.3.	Manual de manteniiiento.....	36
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	39
	CONCLUSIONES.....	41
	RECOMENDACIONES.....	43
	BIBLIOGRAFÍA.....	45
	APÉNDICES.....	47
	ANEXOS.....	85





# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Flujo de calor a través de una pared.....	7
2.	Flujo de calor en una superficie cilíndrica. ....	9
3.	Implementación final del equipo.....	29
4.	Diseño implementado del suministro de aire (vista lateral, escala en metros).....	30
5.	Diseño implementado del suministro de aire (vista frontal, escala en metros).....	30
6.	Diseño implementado del suministro de aire (vista inferior, escala en metros).....	31
7.	Diseño implementado de las resistencias eléctricas .....	31
8.	Diseño del equipo implementado (vista lateral) .....	32
9.	Diseño del equipo implementado (en elevación) .....	32
10.	Diseño del equipo implementado (vista de planta) .....	33
11.	Diagrama de flujo de equipo .....	34

## TABLAS

I.	Variables de operación .....	25
II.	Recursos materiales utilizados.....	27
III.	Simbología del diagrama de flujo de equipo .....	35
IV.	Actividades de mantenimiento preventivo .....	36
V.	Gastos económicos.....	37



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Área transversal de flujo de calor
<b>Cp</b>	Calor específico
<b><math>\rho</math></b>	Densidad
<b>dq</b>	Cantidad de flujo de calor
<b>h</b>	Coefficiente individual de transferencia de calor
<b>k</b>	Coefficiente de conductividad térmica
<b>D</b>	Diámetro
<b>Do</b>	Diámetro externo
<b>Di</b>	Diámetro interno
<b><math>\epsilon</math></b>	Error absoluto
<b>ma</b>	Flujo másico
<b>dT/dx</b>	Gradiente de temperatura
<b>°C</b>	Grados Celcius
<b>K</b>	Grados Kelvin
<b>kg</b>	Kilogramos
<b>L</b>	Longitud
<b>m</b>	Metros
<b>Nu</b>	Número de Nusselt
<b>Pr</b>	Número de Prandtl
<b>Re</b>	Número de Reynolds
<b>S</b>	Segundos
<b>T</b>	Temperatura
<b>Ta</b>	Temperatura ambiente

<b>T<sub>i</sub></b>	Temperatura de entrada
<b>T<sub>o</sub></b>	Temperatura de salida
<b>T<sub>s</sub></b>	Temperatura de superficie
<b>V</b>	Velocidad
<b>μ</b>	Viscosidad dinámica

## GLOSARIO

<b>Arduino 1</b>	Es una placa de desarrollo de hardware y software, compuesta respectivamente por circuitos impresos, se enfoca en acercar y facilitar el uso de la electrónica y programación de sistemas.
<b>AutoCAD</b>	Es un software de diseño asistido por computadora utilizado para dibujo 2D y modelado 3D.
<b>Conducción</b>	Es un proceso de transmisión de calor, basado en el contacto directo entre los cuerpos, sin intercambio de materia, por el que el calor fluye desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura que está en contacto con el primero.
<b>Convección</b>	Es una de las tres formas de transferencia de calor, se caracteriza porque se produce por medio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas.
<b>LCD</b>	Es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color monocromos.
<b>Radiación</b>	Es el calor emitido por un cuerpo debido a su temperatura, en este caso no existe contacto entre

los cuerpos, ni fluidos intermedios que transporten el calor.

## RESUMEN

El objetivo del informe final de graduación fue el diseño e implementación de un equipo para la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor por convección interna forzada en el laboratorio de operaciones unitarias.

Se calcularon los parámetros de diseño adecuados para construir la unidad que brinde al estudiante las condiciones necesarias para que pueda aplicar los conocimientos adquiridos en el curso de transferencia de calor.

Se contó con materiales para la construcción del equipo, como, tubería de cobre de diámetro y longitud conocida, un ventilador para la succión de aire, sensores de temperatura y una resistencia eléctrica para la generación de calor. El ventilador succiona aire que se conduce por un ducto, hasta llegar a la resistencia eléctrica, donde se calienta, el aire caliente se conduce por una reducción cónica, al salir de esta área entra a un tubo de cobre donde se verifica el intercambio de calor con el aire del ambiente, donde se instalaron sensores de temperatura tanto en la entrada como en la salida de dicho tubo, lo que permitió llevar un registro detallado de las temperaturas en un panel LCD controlados por una *raspberry pi*.

Se realizaron pruebas de arranque y funcionamiento, así mismo se diseñó un instructivo para la utilización del equipo en el laboratorio y un manual de mantenimiento preventivo y correctivo.





# OBJETIVOS

## General

Diseñar e implementar un equipo para la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor por convección interna forzada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

## Específicos

1. Diseñar un equipo didáctico para la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor.
2. Construir un equipo que permita la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor.
3. Desarrollar una práctica experimental utilizando el equipo construido, para los estudiantes del Laboratorio de Operaciones Unitarias.
4. Proponer un manual de utilización y mantenimiento del equipo construido.

## **Hipótesis**

Es posible diseñar y construir una unidad para la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor por convección interna forzada para el aire en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

## INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor es el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura. Cuando un cuerpo, un objeto sólido o un fluido, está a una temperatura diferente de la de su entorno u otro cuerpo, la transferencia de energía térmica, también conocida como transferencia de calor o intercambio de calor, ocurre de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen equilibrio térmico.

La transferencia de calor siempre ocurre desde un cuerpo más caliente a uno más frío, como resultado de la segunda ley de la termodinámica. Cuando existe una diferencia de temperatura entre dos objetos en proximidad uno del otro, la transferencia de calor no puede ser detenida, solo puede hacerse más lenta.

La transferencia de calor por convección es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por medio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Lo que se llama convección en sí, es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido.

La transferencia de calor implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Se incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido o por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico lo que causa convección mecánica, forzada o asistida.



## 1. ANTECEDENTES

Diferentes estudios se han presentado para la implementación de prácticas experimentales aplicadas a un laboratorio de operaciones unitarias, las cuales abarcan diferentes temas de interés de la ingeniería química.

- *La función docente en el diseño y montaje del evaporador de película ascendente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.* Trabajo de graduación presentado por Héctor Garrido Atanacio, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1991.
- *Propuesta de una práctica experimental de control automático del proceso de transferencia de calor, en el intercambiador de tubos concéntricos del Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad de San Carlos.* Trabajo de graduación presentado por David Cerezo Toledo. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005.
- *Diseño de la práctica simulada de refrigeración en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.* Trabajo de graduación presentado por Adolfo Macario Castro. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009.
- *Desarrollo de un equipo y una práctica experimental didáctica para demostrar el fenómeno de cavitación de forma física, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.* Trabajo de

graduación presentado por Leda Marysol Gómez Montenegro. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013.

- *Dimensionamiento, construcción y evaluación de dos intercambiadores de calor de tubos concéntricos, fabricados con mano de obra y tecnología disponible en Guatemala, Facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.* Trabajo de graduación presentado por Luis Eduardo Gómez Coyoy, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1992.

### **1.1. Justificación**

En el Laboratorio de Operaciones Unitarias no existe un equipo para la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor, y todos los equipos de transferencia de calor usan vapor y este utilizará una resistencia por lo que existe disponibilidad inmediata para el uso del equipo.

Es importante que el estudiante pueda tener medios prácticos que refuercen lo aprendido en la parte de los cursos teóricos; por esa razón se pretende diseñar y construir un equipo para la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor por convección interna forzada. De esta manera se busca contribuir con el estudiante para que el aprendizaje sea complementado con prácticas de laboratorio, ya que los procesos de transferencia de calor son una parte esencial en el desempeño profesional del futuro ingeniero químico.

## **1.2 Determinación del problema**

Se diseñó e implementó una unidad para la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor por convección interna forzada para el aire, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

### **1.2.1. Definición**

En el Laboratorio de Operaciones Unitaria, no existe un equipo para la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor por convección interna forzada; y los equipos de transferencia de calor que se encuentran en el laboratorio dependen de vapor producido por la caldera, por lo que se propone un equipo que funciona a base de una resistencia eléctrica.

### **1.2.2. Delimitación**

Se limitará el estudio de coeficientes individuales de transferencia de calor para aire, desde temperatura ambiente hasta 100 °C, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, utilizando tubería de cobre tipo K.





## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Transferencia de calor**

La transferencia de calor se define como el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura.

La ciencia de la transferencia de calor no sólo trata de explicar cómo puede ser transferida la energía calorífica, sino también trata de predecir la rapidez a la que se realizará este intercambio bajo ciertas condiciones específicas. La transferencia de calor completa al primer y segundo principios de la termodinámica, al proporcionar reglas experimentales adicionales que se pueden utilizar para establecer la rapidez de transferencia de energía.

El calor puede transferirse por conducción, convección y radiación o por una combinación de los tres modos. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. El calor siempre se mueve de las zonas más calientes a las más frías; busca el equilibrio. Cuanto mayor es la diferencia de temperatura, más rápidamente fluye el calor hacia la zona más fría.

## **2.2. Mecanismos de transferencia de calor**

A continuación se describen los mecanismos de transferencia de calor que son la conducción, convección y radiación.

### **2.2.1. Conducción**

Es la transmisión de energía calorífica de molécula a molécula, a través, de un material, ya sea sólido, líquido o gaseoso. Para que el calor se transmita por conducción, deberá haber contacto físico entre partículas y cierta diferencia de temperatura. Así, la conductividad térmica es la medida de la velocidad a la que el flujo de calor pasa de una partícula a otra. La tasa de flujo de calor a través de un material específico estará determinada por la diferencia de temperatura y la conductividad térmica del material.

#### **2.2.1.1. Transferencia de calor por conducción**

La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo tal como la pared estacionaria. La dirección del flujo de calor será a ángulos rectos a la pared, si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico. Supóngase que una fuente de calor existe a la izquierda de la pared y que existe un receptor de calor en la superficie derecha. Es conocido y después se confirmará por una derivación, que el flujo de calor por hora es proporcional al cambio de temperatura a través de la pared y al área de la pared  $A$ . Si  $T$  es la temperatura en cualquier punto de la pared y  $x$  es el espesor de la pared en dirección del flujo de calor, y  $dq$  es dada por la ecuación de *Fourier*.

$$dq = k A \left( - \frac{dT}{dx} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$Dq$  = cantidad de flujo de calor. (W)

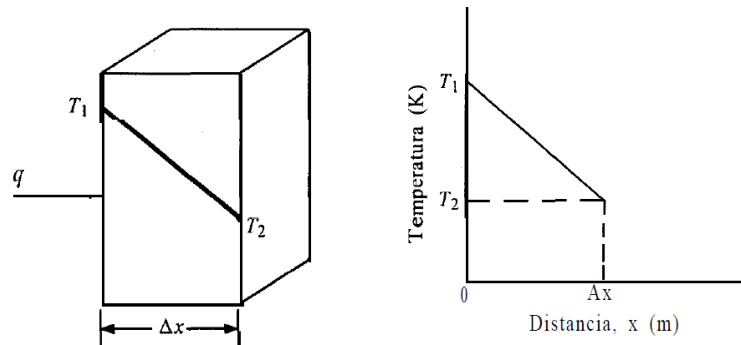
$K$  = coeficiente de conductividad térmica del material  $\left( \frac{W}{m \text{ } ^\circ C} \right)$

$A$  = área transversal al flujo de calor (m<sup>2</sup>)

$-\frac{dT}{dx}$  = gradiente de temperatura

El término  $-\frac{dT}{dx}$ , tiene un signo negativo si se supuso una temperatura mayor en la cara de la pared en donde  $x = 0$  y menor en la cara donde  $x = X$ . En otras palabras, la cantidad instantánea de transferencia de calor es proporcional al área y a la diferencia de temperatura  $dT$  que impulsa el calor a través de la pared de espesor  $dx$ . La constante de proporcionalidad  $k$  es peculiar a la conducción de calor por conductividad.

Figura 1. **Flujo de calor a través de una pared**



Fuente: GEANKOPLIS, Christie J. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. p. 248

### 2.2.1.2. Conductividad térmica

Es una medida de la capacidad de un material para conducir el calor a través de su masa. Cada material, ya sea aislante o de otro tipo, tiene un valor de conductividad térmica específico que permite determinar su eficacia como aislante del calor. Puede definirse como la cantidad de calor o energía (expresada en *Kcal*, *Btu* o J) que puede conducirse por unidad de tiempo a través de la unidad de superficie de un material de espesor unitario, cuando la diferencia de temperatura es la unidad. La conductividad térmica puede expresarse en  $\frac{kcal}{m^{\circ}C}$ , en  $\frac{Btu}{ft^{\circ}F}$  y en el SI, en  $\frac{W}{m^{\circ}C}$ .

Esta conductividad se evalúa experimentalmente y está básicamente definida por la ecuación de Fourier. Aun cuando la conducción de calor se asocia usualmente con la transferencia de calor a través de los sólidos, también es aplicable a gases y líquidos, con sus limitaciones.

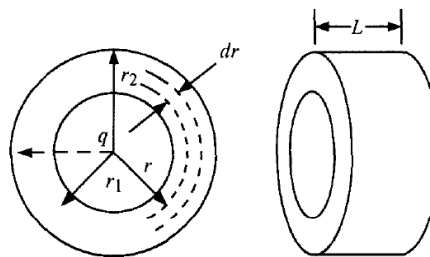
### 2.2.1.3. Conductividad térmica en gases

El mecanismo de conducción térmica de los gases es bastante simple. Las moléculas poseen un movimiento continuo y desordenado y chocan entre sí intercambiando energía y momento lineal. Si una molécula se desplaza de una región de temperatura elevada a otra de temperatura inferior, transporta energía cinética a esa región y la cede de chocar con moléculas de baja energía. Puesto que las moléculas se mueven con más rapidez cuanto menor es su tamaño, los gases como el hidrógeno tienen conductividades térmicas más elevadas.

#### 2.2.1.4. Conducción de calor en paredes cilíndricas

Esta teoría se aplica comúnmente en el cálculo de la cantidad de calor que se pierde o gana en cilindros aislados. Para las condiciones preestablecidas de conducción de calor en estado estable, unidireccional y material homogéneo, se analizará una pared cilíndrica de radio interior  $r_i$  y de radio exterior  $r_o$ , las superficies interior y exterior se mantienen a  $T_i$  y  $T_o$  respectivamente.

**Figura 2. Flujo de calor en una superficie cilíndrica**



Fuente: GEANKOPLIS, Christie J. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. p.248

Utilizando la ecuación de *Fourier* e integrando en los límites propuestos.

$$q = -k \cdot A \frac{dT}{dr} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$q = \frac{2\pi k L}{\ln \frac{r_o}{r_i}} (T_i - T_o) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

A = área radial perpendicular al flujo de calor.  $A = 2\pi rL$  (m<sup>2</sup>)

L = longitud del tubo (m)

Ri, ro = radio interno y externo del tubo respectivamente (m)

Ti, To = temperatura interna y externa del tubo respectivamente (°C)

Por lo tanto, la resistencia térmica por conducción para una pared cilíndrica es:

$$R = \frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{2\pi kL} \quad \text{Ecuación 4}$$

### 2.2.2. Radiación

La energía calorífica se transmite en forma de luz como radiación infrarroja u otro tipo de ondas electromagnéticas. Esta energía emana de un cuerpo caliente y sólo puede transmitirse libremente a través de medios completamente transparentes. La atmósfera, el vidrio y los materiales translúcidos dejan pasar una cantidad significativa de calor radiante que puede ser absorbido cuando incide en una superficie: por ejemplo, la superficie de la cubierta del barco en un día soleado absorbe calor radiante y se calienta. Es un hecho sobradamente conocido que las superficies de colores claros o brillantes reflejan más calor radiante que las superficies negras u oscuras, por lo que las primeras tardarán más tiempo en calentarse.

### 2.2.3. Convección

Es la transmisión de calor debido al movimiento del aire (o un gas) o un líquido calentado de un lugar a otro, llevando consigo el calor que contiene. La tasa de flujo de calor varía en función de la temperatura del gas o líquido en movimiento y de su caudal.

### **2.2.3.1. Convección natural**

Se define la convección natural como el movimiento convectivo producido en fluido y debido solamente a la variación de temperatura (cambio de densidades) en el interior del fluido.

### **2.2.3.2. Convección forzada**

Se denomina convección forzada a la convección en donde el fluido es inducido por un agente mecánico. Ejemplo: bomba, ventilador u otro dispositivo mecánico. El adjetivo externo e interno se refiere al confinamiento del flujo. Si la circulación del fluido se realiza a través de un espacio cerrado (ejemplo tubería), se dice que el flujo es interno; por el contrario si el flujo no se encuentra confinado, se le da el adjetivo de externo, por ejemplo, el flujo de aire impulsado por un ventilador.

### **2.2.3.3. Transferencia de calor por convección**

La convección es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de mezcla. Supóngase que un recipiente con un líquido se coloca sobre una llama caliente. El líquido que se encuentra en el fondo del recipiente se calienta y se vuelve menos denso que antes, debido a su expansión térmica. El líquido adyacente al fondo también es menos denso que la porción superior fría y asciende a través de ella, transmitiendo su calor por medio de mezcla conforme asciende.

La transferencia de calor del líquido caliente del fondo del recipiente al resto, es convección natural o convección libre. Si se produce cualquier otra agitación, tal como la provocada por un agitador, el proceso es de convección

forzada. Este tipo de transferencia de calor puede ser descrito en una ecuación que limita la forma de la ecuación de conducción y es dada por:

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$q$  = flujo de calor (W)

$h$  = coeficiente de transferencia de calor por convección ( $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ )

$A$  = área en contacto con el fluido ( $m^2$ )

$T_w$  = temperatura de la superficie ( $^\circ C$ )

$T_\infty$  = temperatura del fluido circundante ( $^\circ C$ )

La constante de proporcionalidad  $h$  es un término sobre el cual tiene influencia la naturaleza del fluido y la forma de agitación y debe ser evaluado en forma experimental. Se llama coeficiente de transferencia de calor cuando la constante se escribe en su forma integrada  $q = hA \Delta T$ , se le conoce como la ley del enfriamiento de Newton.

La resistencia térmica por convección se evalúa con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{1}{h A} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$A$  = área de contacto con el fluido ( $m^2$ ).



#### 2.2.3.4. Coeficiente de transferencia de calor por convección

El coeficiente de transferencia de calor por convección no es una propiedad, su magnitud depende de una variedad de factores: velocidad, densidad, viscosidad, conductividad térmica, calor específico del fluido, geometría de la superficie, presencia de fuerzas de flotamiento, entre otros.

Existen varios métodos para el cálculo de coeficiente de convección de calor por convección.

- Análisis dimensional combinado con experimentos.
- Soluciones matemáticas exactas de las ecuaciones de capa de frontera.
- Análisis aproximado de la capa frontera por métodos integrales.
- Analogía entre transferencia de calor, transferencia de masa y transferencia de cantidad de movimiento.

El objetivo de la transferencia de calor por convección es determinar la razón de transferencia de calor entre un medio sólido y un fluido adyacente, siempre que exista una diferencia de temperatura, puesto que existe una capa delgada estacionaria junto a la superficie de un sólido existe conducción de calor, un balance de energía permite observar que el flujo de calor por convección es igual al flujo de calor por conducción en  $y = 0$ .

Se define una distancia sin dimensiones  $n$  la misma que  $n = y/Lc$ , donde:

$Lc$  es una longitud característica que depende la geometría del medio sólido, se obtiene:

$$Nu = \frac{h Lc}{k_f} = -\frac{1}{T_w - T_\infty} \left( \frac{dT}{dn} \right)_{n=0} \quad \text{Ecuación 7}$$

Aunque la ecuación Fourier se emplea generalmente para determinar la rapidez del flujo de calor por convección entre una superficie y el fluido en contacto con ella, esta es más bien la definición del coeficiente de calor por convección. Más adelante se analizan las expresiones que permitirán determinar el coeficiente  $h$  para flujo interno y externo.

La mayoría de los problemas de transferencia de calor por convección de interés práctico, debido a la complejidad matemática de sus ecuaciones, se estudia experimentalmente y los resultados se presentan en forma de ecuaciones empíricas que se expresan en función de los grupos adimensionales. Los grupos adimensionales que se utilizan en la transferencia de calor por convección, básicamente son los siguientes:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$Nu = \frac{h L_c}{k} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

Re = número de *Reynolds* (adimensional)

Pr = número de *Prandtl* (adimensional)

Nu = número de *Nusselt* (adimensional)

$\rho$  = densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

V = velocidad del fluido (m/s)

$\mu$  = viscosidad dinámica del fluido ( $\frac{\text{kg}}{\text{m s}}$ )

$C_p$  = calor específico del fluido  $\left(\frac{J}{kg \text{ } ^\circ C}\right)$

$K$  = conductividad térmica del fluido  $\left(\frac{W}{m \text{ } ^\circ C}\right)$

$H$  = coeficiente de transferencia de calor por convección  $\left(\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}\right)$

$D$  = diámetro de tubería (m)

$L_c$  = longitud característica (m)

Donde la longitud característica está definida como:

$$L_c = \frac{4 A}{P} = D \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$A$  = área de sección transversal al flujo ( $m^2$ )

$P$  = perímetro mojado (m)

$D$  = diámetro de tubo (m)

### 2.3. Calor específico

Es la cantidad de energía necesaria para incrementar en una unidad de temperatura ( $^\circ C$ ) una cantidad de sustancia (kg).

### 2.4. Número de Nusselt

Es un número adimensional que mide el aumento de transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si esta ocurriera solamente por conducción.

La transferencia de calor dentro de una cavidad por convección natural, cuando el número de Reynolds es inferior a 1 000 se considera que la transferencia de calor es únicamente por conducción y el número de *Nusselt* toma el valor de la unidad. En cambio para números de Reynolds superiores, la transferencia de calor es una combinación de conducción y convección, y el número de *Nusselt* toma valores superiores. Se define como:

$$Nu = \frac{\text{Transferencia de calor por convección}}{\text{Transferencia de calor por conducción}} = \frac{h L_c}{k_f} \quad \text{Ecuación 12}$$

El número de *Nusselt* puede también verse como un gradiente adimensional de temperatura en la superficie.

- Cuanto mayor es el número de *Nusselt* más eficaz es la convección.
- Un número de *Nusselt* de  $Nu = 1$ , para una capa de fluido, representa transferencia de calor a través de ésta por conducción pura.

El número de *Nusselt* se emplea tanto en convección forzada como natural.

## 2.5. Número de Prandtl

Es un número adimensional proporcional al cociente entre la difusividad de momento (viscosidad) y la difusividad térmica. Se llama así en honor a Ludwig Prandtl.

Se define como:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\text{Velocidad de difusión de momento}}{\text{Velocidad de difusión de calor}} = \frac{C_p \mu}{k} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

Pr = número de Prandtl

$C_p$  = calor específico del fluido  $\left(\frac{J}{kg \text{ } ^\circ C}\right)$

$\mu$  = viscosidad dinámica del fluido  $\left(\frac{kg}{m \text{ } s}\right)$

$k$  = conductividad térmica del fluido  $\left(\frac{W}{m \text{ } ^\circ C}\right)$

$\nu$  = viscosidad cinemática  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

$\alpha$  = difusividad térmica  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

Los metales líquidos poseen números de *Prandtl* muy bajos, los gases presenta la particularidad de tener un número de *Prandtl* en torno a 0,70, el agua tiene un valor intermedio, y finalmente los valores mayores del número de *Prandtl* lo presentan los fluidos viscosos. En problemas de transferencia de calor el número de *Prandtl* controla el espesor relativo de las capas límite de momento y térmica. Cuando *Pr* es pequeño significa que el calor se difunde muy rápido comparado con la velocidad (momento).

## 2.6. Número de Reynolds

Representa la relación que existe entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas que actúan sobre un elemento de volumen de un fluido. Es un indicativo del tipo de flujo del fluido, laminar o turbulento.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{V Lc}{\nu} = \frac{\rho V Lc}{\mu} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

$\rho$  = densidad del fluido  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

$V$  = velocidad media del fluido  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$Lc$  = longitud característica  $(m)$

$\nu$  = viscosidad cinemática  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

$\mu$  = viscosidad dinámica  $\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$

- Un valor grande del número de *Reynolds* indica régimen turbulento.
- Un valor pequeño del número de *Reynolds* indica régimen laminar.
- El valor del número de *Reynolds* para el cual el flujo se vuelve turbulento es el número crítico de *Reynolds*. Este valor crítico es diferente para las diferentes configuraciones geométricas.
- Para una placa plana crítico  $Re = 5 \times 10^5$
- Para tubos: si  $Re < 2300$  el flujo es laminar. Si  $2300 < Re < 10000$  el flujo es de transición. Si  $Re > 10000$  el flujo es turbulento.
- El número de *Reynolds* sólo se utiliza en convección forzada.

## 2.7. Flujo laminar en tubos

El flujo en tubos es laminar para  $Re \leq 2300$  está completamente desarrollado si el tubo es suficientemente largo (en relación con la longitud de entrada). Se considera el flujo laminar estacionario de un fluido incompresible

con propiedades constantes, en la región completamente desarrollada de un tubo circular recto.

### 2.7.1 Desarrollo de flujo laminar en la región de entrada

Para un tubo circular de longitud  $L$  sujeto a temperatura superficial constante, el número promedio de *Nusselt* para la región de entrada térmica se puede determinar a partir de la ecuación:

$$Nu = 3,66 + \frac{0,065\left(\frac{D}{L}\right)Re Pr}{1+0,04\left[\left(\frac{D}{L}\right)Re Pr\right]^{2/3}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Cuando la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido es grande, puede ser necesario tomar en cuenta la variación de la viscosidad con la temperatura. En ese caso, se puede determinar el número de Nusselt promedio para el flujo laminar en desarrollo en un tubo circular a partir de la ecuación de Sieder y Tate para flujo laminar:

$$Nu = 1,86 \left(\frac{Re Pr D}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s}\right)^{0,14} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

$Un$  = número adimensional de Nusselt

$D$  = diámetro de la tubería (m)

$L$  = longitud de tubería (m)

$\mu_b$  = viscosidad del fluido a la temperatura de volumen promedio (Pa.s)

$\mu_s$  = viscosidad a la temperatura de la pared

$C_p$  = capacidad calorífica (J/kg.K)

## 2.8. Flujo turbulento en tubos

El flujo en los tubos lisos es completamente turbulento para  $Re > 10000$ . El flujo turbulento se utiliza de manera común en la práctica debido a los coeficientes más altos de transferencia de calor asociados con él.

Para tubos lisos, el factor de fricción en el flujo turbulento se puede determinar a partir de la primera ecuación de Petukhov explícita dada como:

$$f = (0,790 \ln Re - 1,64)^{-2} \quad \text{Ecuación 17}$$

El número de Nusselt en el flujo turbulento está relacionado con el factor de fricción a través de la *analogía de Chilton-Colburn*, expresada como:

$$Nu = 0,125 f Re Pr^{1/3} \quad \text{Ecuación 18}$$

## 2.9. Ecuación de Dittus-Boelter, Sieder y Tate, y Gnielinski para flujo turbulento

Para el flujo turbulento completamente desarrollado en tubos lisos, se puede obtener una relación simple para el número de Nusselt la cual se conoce como ecuación de Colburn:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{1/3} \quad \text{Ecuación 19}$$

De la mejora de la ecuación de Colburn, para mejorar la precisión de esta ecuación al modificarla como la ecuación de Dittus-Boelter, que puede utilizarse cuando la diferencia de temperatura entre el fluido y la superficie de la pared no es grande:



$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^n \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

$N = 0,4$  para calentamiento y  $0,3$  para enfriamiento

Cuando la variación de temperatura es grande, se utiliza la ecuación de Sieder y Tate para flujo turbulento:

$$Nu = 0,027 Re^{0,8} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_S} \right)^{0,14} \quad \text{Ecuación 21}$$

Para reducir errores de las relaciones del número de Nusselt, se utilizan relaciones más complejas pero precisas, como la segunda ecuación de Petukhov, expresada como:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) Re Pr}{1,07 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} (Pr^{2/3} - 1)} \quad \text{Ecuación 22}$$

Para mejorar la exactitud de esta relación, se modifica como la ecuación de Gnielinski:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} (Pr^{2/3} - 1)} \quad \text{Ecuación 23}$$

El factor de fricción  $f$  se calcula a partir de la primera ecuación de Petukhov, donde las propiedades deben evaluarse a la temperatura media de la masa del fluido.

## **2.10. Ventiladores**

Los ventiladores son máquinas rotatorias capaces de mover una determinada masa de aire, a la que comunican una cierta presión, suficiente para que pueda vencer las pérdidas de carga que se producirán en la circulación por los conductos se componen de:

- Elemento rotativo
- Soporte
- Motor

El elemento rotativo es la pieza del ventilador que gira en torno al eje del mismo. Puede ser una hélice o un rodete, lo llamaremos hélice si la dirección de salida del aire impulsado es paralela el eje del ventilador (dirección axial), generalmente la hélice puede mover gran cantidad de aire comunicando al mismo una discreta presión, lo llamaremos rodete si la dirección de salida del aire impulsado es perpendicular al eje del ventilador. Generalmente los rodetes mueven un volumen de aire menor que las hélices, pero con una presión mucho mayor.

### **2.10.1. Clasificación de los ventiladores**

Los ventiladores, denominados así de una forma amplia para todas sus concepciones, pueden clasificarse de formas muy diferentes, siendo la más común la siguiente:

Según la trayectoria del aire en el ventilador: centrífugos, axiales, helicocentrífugos y tangenciales.

Ventiladores centrífugos, en los que el aire entra en el rodete con una trayectoria esencialmente axial y sale en dirección perpendicular.



### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Variables

A continuación se describen las variables de operación y constantes de la unidad:

Tabla I. Variables de operación

Núm.	Variable	Unidad	Dependiente	Independiente
1	Longitud	M		X
2	Diámetro	M		X
3	Temperatura entrada	°C	X	
4	Temperatura salida	°C	X	
5	Resistencia	Ohmios		X
6	Velocidad del flujo	m/s		X
7	Densidad del flujo	kg/m <sup>3</sup>		X

Fuente: elaboración propia.

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

El equipo se diseñó con un ventilador para generar aire, el cual es el fluido de trabajo: se direcciona por un cono hacia un tubo de cobre donde se miden las temperaturas de entrada y salida para determinar coeficientes individuales de transferencia de calor por convección forzada.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

- Investigador: Karen Noelia Hernández Avila
- Asesor: Jorge Emilio Godínez Lemus

### **3.4 Recursos materiales**

En la tabla II se hace una descripción de los recursos utilizados para la elaboración de la unidad.

Tabla II. **Recursos materiales utilizados**

Descripción	Dimensión	Unidades utilizadas
Tubo de cobre rígido	2-1/8"	1
Copla recta de cobre	2-1/8"	2
Plystone	11mm x 4' x 8'	3
Madera	35 mm x 17.32" x 18.90"	7
Empaque de hule	35" x 61"	1
Ángulo de aluminio	1 x 1 x 1/16"	1
Tornillo de tablayeso	1/2"	100
Tornillo de tablayeso	1"	100
Tornillo de tablayeso	1-1/2"	100
Tornillo de tablayeso	2"	100
Sellador sikaflex	--	4
Pintura de aceite	0.50 gal	1
Fuente de poder	700 watts	2
Ventilador	--	1
Sensores de temperatura	--	2
Pantalla LCD	--	1

Fuente: elaboración propia.





## 4. RESULTADOS

Resultados finales obtenidos a partir de los diseños elaborados en etapas preliminares.

### 4.1. Diseño e implementación del equipo para la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor

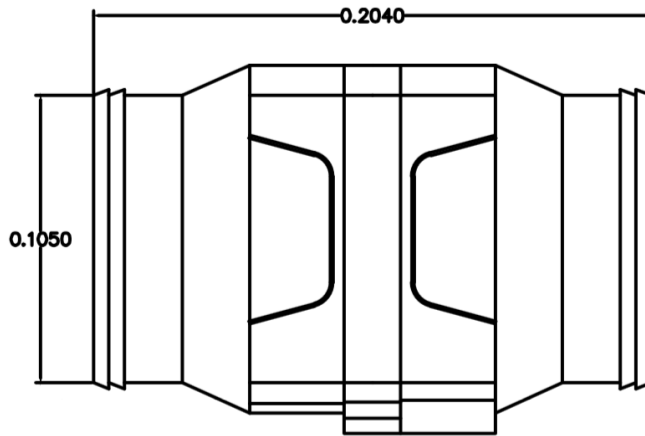
De las figuras 3 a la 10 se describe el diseño del equipo para la medición.

Figura 3. **Implementación final del equipo**



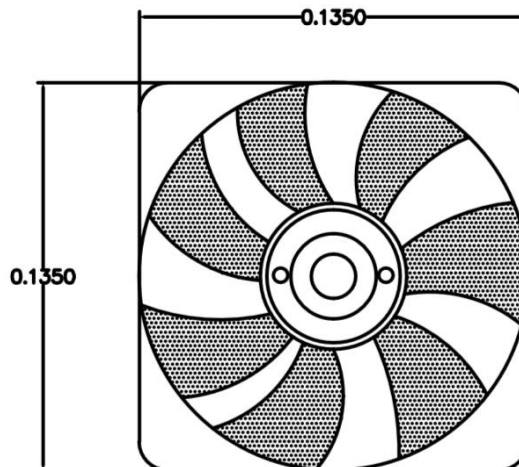
Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Figura 4. **Diseño implementado del suministro de aire (vista lateral, escala en metros)**



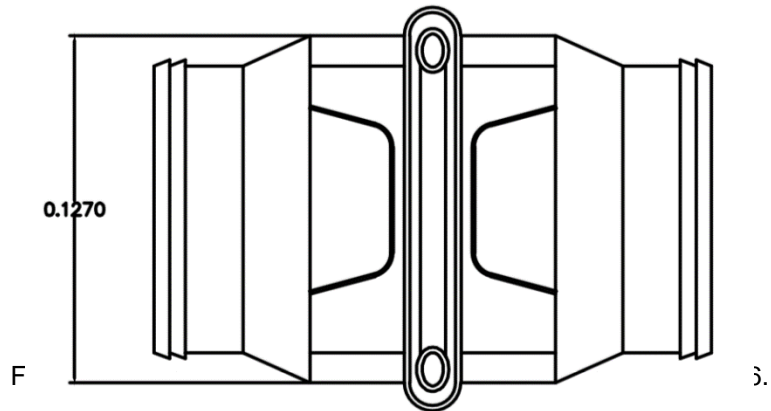
Fuente: elaboración propia, utilizando programa AutoCAD 2016.

Figura 5. **Diseño implementado del suministro de aire (vista frontal, escala en metros)**



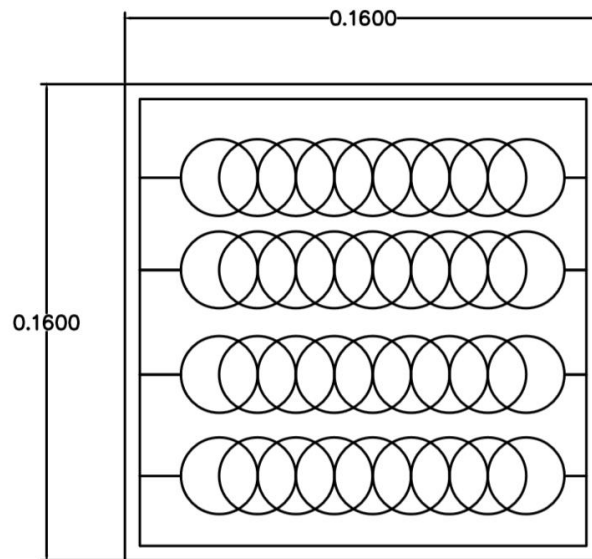
Fuente: elaboración propia, utilizando programa AutoCAD 2016.

Figura 6. **Diseño implementado del suministro de aire (vista inferior, escala en metros)**



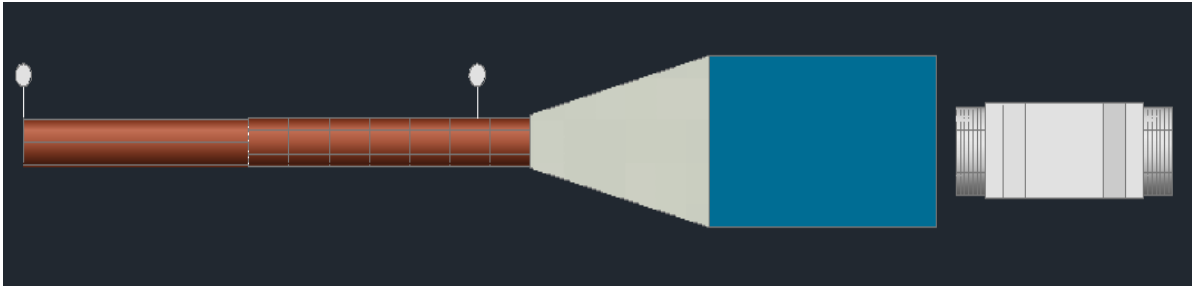
Fuente: elaboración propia, utilizando programa AutoCAD 2016.

Figura 7. **Diseño implementado de las resistencias eléctricas**



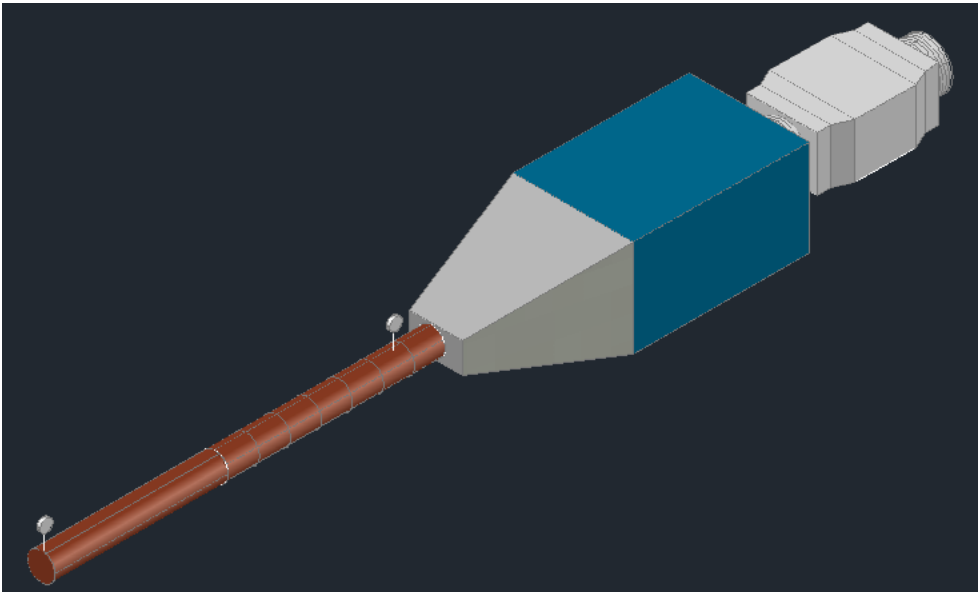
Fuente: elaboración propia, utilizando programa AutoCAD 2016.

Figura 8. **Diseño del equipo implementado (vista lateral)**



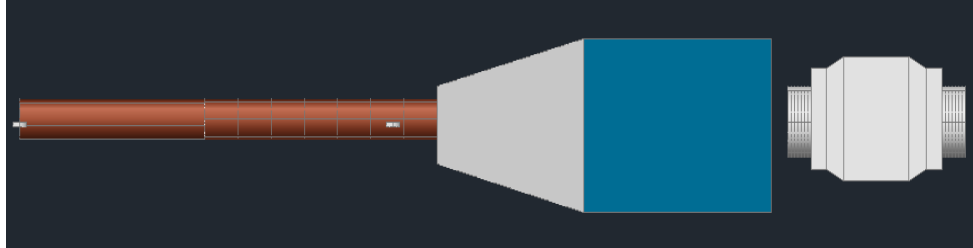
Fuente: elaboración propia, utilizando programa AutoCAD 2016.

Figura 9. **Diseño del equipo implementado (en elevación)**



Fuente: elaboración propia, utilizando programa AutoCAD 2016.

Figura 10. **Diseño del equipo implementado (vista de planta)**



Fuente: elaboración propia, utilizando programa AutoCAD 2016.

## **4.2. Instructivo de realización de práctica**

La práctica experimental desarrollada propone el objetivo general y los objetivos específicos para la realización del informe con base en datos recolectados durante la experimentación.

### **4.2.1 Objetivo general**

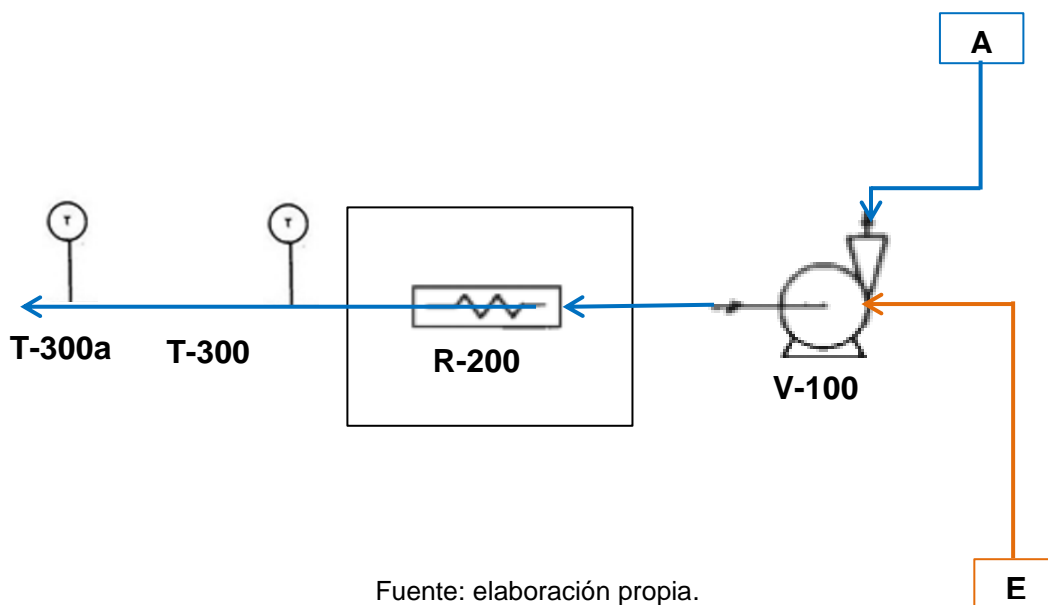
Aplicar análisis dimensional para encontrar un modelo que describa el comportamiento del coeficiente individual de transferencia de calor en convección forzada y convección natural según las variables del equipo.

### **4.2.2 Objetivos específicos**

1. Determinar el comportamiento del NTU en función de la velocidad del aire.
2. Determinar el comportamiento de la eficiencia térmica en función de la velocidad del aire.


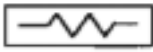



3. Determinar por análisis dimensional el modelo experimental que representa el comportamiento de la transferencia de calor por convección forzada en función de las variables de proceso.
4. Determinar por análisis dimensional el modelo experimental que representa el comportamiento de la transferencia de calor por convección natural en función de las variables de proceso.
5. Determinar el perfil longitud de temperaturas del equipo.
6. Determinar el coeficiente total de transferencia de calor.

Figura 11. **Diagrama de flujo de equipo**



Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Simbología del diagrama de flujo de equipo**

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO
V-100	Ventilador	
R-200	Resistencia eléctrica	
T-300, 300 <sub>a</sub>	Sensores de temperatura	
A	Suministro de aire	
E	Suministro de energía eléctrica	

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.3. Metodología de utilización del equipo

- Accionar el ventilador (V-100).
- Fijar la velocidad del ventilador, utilizando el anemómetro.
- Fijar intensidad de electricidad en resistencia (R-200).
- Esperar a que estabilice la temperatura, medir temperatura de entrada y de salida (T-300 y T-300a).
- Repetir el procedimiento del paso 2 al 4, 5 veces.
- Apagar el sistema y esperar que enfríe.
- Apagar el ventilador (V-100).

### 4.3. Manual de mantenimiento

Continuación se detalla la metodología para el cuidado óptimo de la unidad.

Tabla IV. **Actividades de mantenimiento preventivo**

Actividad/equipo		Procedimiento
Limpieza	Tubo de cobre	Limpiar periódicamente, con un pulidor para metales finos.
	Circuitos de control (raspberry pi, arduino 1), Ventilador	Limpiar periódicamente de partículas con un limpiador de contactos eléctricos 3M.
Inspección	Empaque	Verificar que el empaque se encuentre en óptimas condiciones que no presente desgaste por calor o antigüedad. En caso de no cumplir con las especificaciones, se debe cambiar por uno nuevo de las mismas dimensiones.
	Resistencia	Verificar que la resistencia se encuentre en óptimas condiciones y dé el valor deseado.

Fuente: elaboración propia.



Tabla V. **Gastos económicos**

<b>Núm.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo (Q)</b>
1	Materiales de fabricación del equipo	725,00
2	Tubo de cobre de 1,5 m de longitud y copla recta	500,00
3	Ventilador	560,00
4	Resistencias	200,00
5	Angulares de aluminio	120,00
6	Accesorios varios (cables, brocas para taladro, sierra, tornillos, pintura, brochas, sellador, entre otros)	350,00
7	Combustible vehículo	500,00
8	Impresiones en blanco y negro	150,00
	• Diseño de investigación	50,00
	• Diseños y otros	300,00
9	Varios (comida, parqueo, gasto de materiales de prueba)	300,00
10	Mano de obra	10 000,00
<b>Total</b>		<b>13 755,00</b>

Fuente: elaboración propia.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La figura 3 muestra el equipo implementado para el estudio de coeficientes individuales de transferencia de calor por convección forzada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. El equipo consta de un ventilador para succionar aire a diferentes caudales de operación (figura 5), los cuales se varían por medio de una raspberry pi; dicho caudal pasa por una serie de resistencias que se controlan por un arduino 1 (figura 7) para llegar a un tubo de cobre de 1,5 metros de largo donde se tienen puntos de lectura de temperatura, por medio de sensores de temperatura, los cuales se leen en un monitor instalado en el equipo.

Es indispensable que el estudiante conozca el fundamento teórico de la transferencia de calor que involucra la convección forzada, convección natural, la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor y la relación con las variables de operación del equipo implementado; y así, por medio del análisis dimensional, determinar el comportamiento de la transferencia de calor en función de dichas variables.

Para la comprensión de la utilización del equipo, se realizó un manual de utilización del equipo que por medio de un diagrama de flujo de equipo, con su respectiva codificación se realizó la metodología. Se realizó un manual de mantenimiento preventivo que incluye la limpieza e inspección de las diferentes partes del equipo y, además, se realizó una práctica que incluye el objetivo general y los objetivos específicos, para que los alumnos a partir de la

experimentación, sean capaces de generar un informe que involucre las variables de operación y las variables de cálculo.

En la tabla V, de los gastos económicos, se estimó un costo final en la implementación del equipo que fue de Q. 13 755,00, el cual resulta una buena inversión porque se deja una unidad que sirve de herramienta para la formación de los estudiantes que cursen el Laboratorio de Ingeniería Química 1 y también al realizar la comparación con unidades que venden fabricadas, las cuales alcanzan un valor de \$ 9 500,00 (Q. 71 250,00).

Para el cálculo del diseño del equipo, se contaba con materiales suministrados por el asesor: el tubo de cobre de 1.5 metros de longitud. Con base en esto y que la temperatura de entrada en el tubo no debía exceder los 60°C para no causar riesgos de quemaduras en los alumnos, se calculó la temperatura de salida en el tubo siguiendo el procedimiento de parámetros de diseño constante, ver apéndice 1. Por método iterativo se logró determinar la temperatura de salida y la temperatura de superficie del tubo, a diferentes caudales de aire.

## CONCLUSIONES

1. Se diseñó por medio de análisis numérico un equipo didáctico para la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor por convección interna forzada.
2. Se implementó un equipo didáctico para la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor por convección interna forzada e externa natural.
3. Se desarrolló una práctica experimental para la guía de los estudiantes para la realización de futuras prácticas dentro de cursos del Laboratorio de Operaciones Unitarias.
4. Se desarrolló un manual de utilización y un manual de mantenimiento preventivo del equipo implementado para su funcionamiento óptimo.
5. El costo total para la elaboración del proyecto (diseño, montaje del equipo, pruebas de funcionamiento, informe final, documentación y otros gastos) asciende a Q. 13 755,00, sin incluir la instalación eléctrica la cual fue realizada por un estudiante de la carrera de Ingeniería Electrónica.



## RECOMENDACIONES

1. Utilizar el equipo siguiendo la metodología que se indica en los instructivos presentados, tanto de utilización como para el cuidado y mantenimiento del equipo implementado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.
2. Ampliar las aplicaciones del equipo construido para incluir la medición de coeficientes individuales de transferencia de calor por convección natural en superficies extendidas.
3. Para la formación de futuros ingenieros químicos, es necesaria la actualización tecnológica para el diseño de equipos, porque es una herramienta que se utilizará tanto en el transcurso de la licenciatura como al egresar de la carrera.





## BIBLIOGRAFÍA

1. CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 2007. 901 p.
2. GEANKOPLIS, Chrisitie. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3a ed. México: 1998. 1024 p.
3. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. 3a ed. México: Continental, 1999. 641 p.
4. PERRY, Robert. *Manual del ingeniero químico*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 1978. 2735 p.



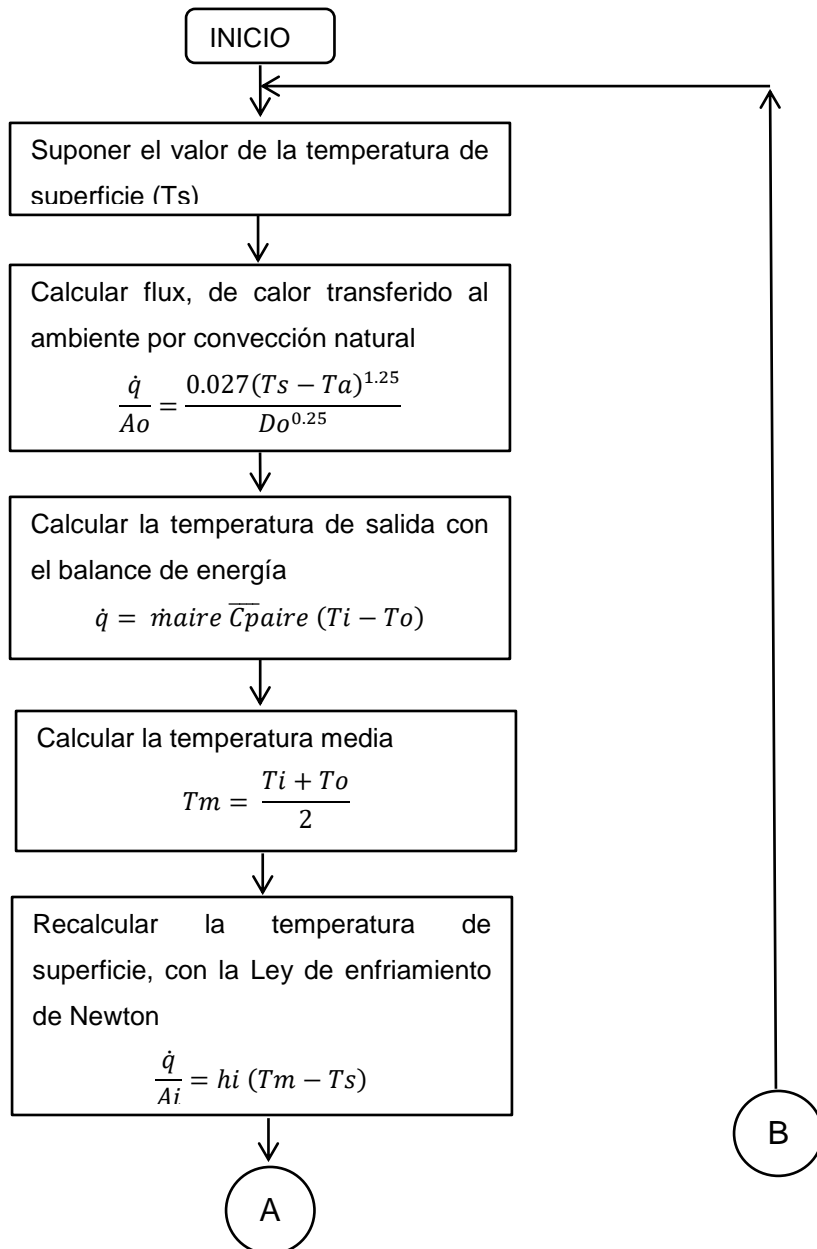
## APÉNDICES

### Apéndice 1. **Parámetros de diseño constantes**

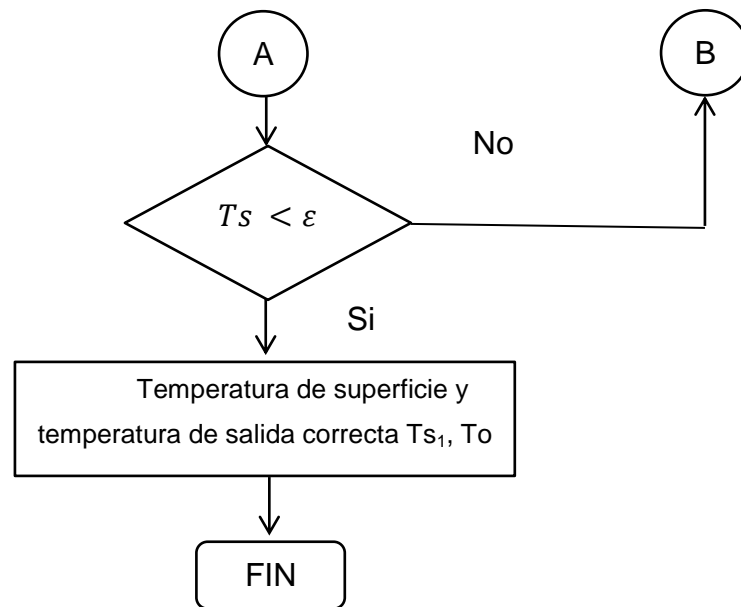
Parámetro	Valor	Unidad (SI)
Diámetro interno	0,05	m
Diámetro externo	0,054	m
Temperatura entrada al tubo	333,15	K
Temperatura ambiente	298,15	K
Área de flujo	0,007854	m <sup>2</sup>
Calor específico del aire	1 002,101	J/kg.K
Densidad del aire	1,11975	kg/m <sup>3</sup>
Longitud del tubo	1,5	m

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Diagrama para el cálculo de la temperatura de salida en interior del tubo**



Continuación del apéndice 2.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 270 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,978	58,567	59,284	54,661	12,161
54,661	518,250	57,229	58,614	49,675	4,986
49,675	411,747	57,798	58,899	51,797	2,122
51,797	456,469	57,559	58,780	50,906	0,891
50,906	437,577	57,660	58,830	51,283	0,376
51,283	445,538	57,618	58,809	51,124	0,159
51,124	442,180	57,636	58,818	51,191	0,067
51,191	443,596	57,628	58,814	51,163	0,028
51,163	442,999	57,631	58,816	51,175	0,012
51,175	443,250	57,630	58,815	51,169	0,005
51,169	443,144	57,630	58,815	51,172	0,002
51,172	443,189	57,630	58,815	51,171	0,001
51,171	443,170	57,630	58,815	51,171	0,000
51,171	443,178	57,630	58,815	51,171	0,000

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 4. Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 265 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,977	58,540	59,270	54,578	12,078
54,578	516,433	57,186	58,593	49,551	5,026
49,551	409,160	57,771	58,885	51,722	2,170
51,722	454,863	57,522	58,761	50,797	0,924
50,797	435,273	57,629	58,814	51,193	0,396
51,193	443,649	57,583	58,791	51,024	0,169
51,024	440,064	57,603	58,801	51,096	0,072
51,096	441,597	57,594	58,797	51,065	0,031
51,065	440,941	57,598	58,799	51,079	0,013
51,079	441,222	57,596	58,798	51,073	0,005
51,073	441,102	57,597	58,798	51,075	0,002
51,075	441,153	57,597	58,798	51,074	0,001
51,074	441,131	57,597	58,798	51,075	0,000
51,075	441,141	57,597	58,798	51,075	0,000
51,075	441,137	57,597	58,798	51,075	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 260 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,977	58,512	59,256	54,492	11,992
54,492	514,555	57,143	58,571	49,424	5,068
49,424	406,510	57,743	58,871	51,645	2,220
51,645	453,226	57,483	58,742	50,685	0,960
50,685	432,902	57,596	58,798	51,102	0,417
51,102	441,721	57,547	58,774	50,921	0,181
50,921	437,890	57,568	58,784	51,000	0,078
51,000	439,553	57,559	58,780	50,966	0,034
50,966	438,831	57,563	58,782	50,980	0,018
50,980	439,145	57,562	58,781	50,974	0,006
50,974	439,008	57,562	58,781	50,977	0,003
50,977	439,068	57,562	58,781	50,976	0,001
50,976	439,042	57,562	58,781	50,976	0,000
50,976	439,053	57,562	58,781	50,976	0,000

Fuente: elaboración propia.



**Apéndice 6. Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 255 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,978	58,483	59,241	54,403	11,903
54,403	512,612	57,098	58,549	49,293	5,110
49,293	403,794	57,714	58,857	51,566	2,273
51,566	451,557	57,443	58,722	50,569	0,998
50,569	430,462	57,563	58,781	51,009	0,441
51,009	439,754	57,510	58,755	50,815	0,194
50,815	435,656	57,533	58,767	50,901	0,086
50,901	437,462	57,523	58,762	50,863	0,038
50,863	436,666	57,528	58,764	50,880	0,017
50,880	437,017	57,526	58,763	50,872	0,007
50,872	436,862	57,527	58,763	50,875	0,003
50,875	436,930	57,526	58,763	50,874	0,001
50,874	436,900	57,526	58,763	50,875	0,001
50,875	436,913	57,526	58,763	50,874	0,000
50,874	436,907	57,526	58,763	50,875	0,000
50,875	436,910	57,526	58,763	50,874	0,000
50,874	436,909	57,526	58,763	50,875	0,000
50,875	436,909	57,526	58,763	50,875	0,000
50,875	436,909	57,526	58,763	50,875	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 250 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,978	58,452	59,226	54,310	11,810
54,310	510,598	57,051	58,526	49,159	5,151
49,159	401,011	57,684	58,842	51,486	2,327
51,486	449,854	57,402	58,701	50,449	1,037
50,449	427,946	57,529	58,764	50,914	0,465
50,914	437,745	57,472	58,736	50,706	0,208
50,706	433,357	57,497	58,749	50,799	0,093
50,799	435,321	57,486	58,743	50,758	0,042
50,758	434,441	57,491	58,746	50,776	0,019
50,776	434,835	57,489	58,744	50,768	0,008
50,768	434,659	57,490	58,745	50,772	0,004
50,772	434,738	57,489	58,745	50,770	0,002
50,770	434,703	57,490	58,745	50,771	0,001
50,771	434,718	57,490	58,745	50,770	0,000
50,770	434,711	57,490	58,745	50,770	0,000
50,770	434,714	57,490	58,745	50,770	0,000

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 8. Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 245 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,978	58,421	59,210	54,215	11,7146
54,215	508,511	57,003	58,502	49,022	5,1929
49,022	398,157	57,654	58,827	51,404	2,3825
51,404	448,116	57,359	58,680	50,326	1,0786
50,326	425,353	57,494	58,747	50,817	0,4914
50,817	435,695	57,433	58,716	50,594	0,2233
50,594	430,990	57,460	58,730	50,695	0,1016
50,695	433,129	57,448	58,724	50,649	0,0462
50,649	432,156	57,453	58,727	50,670	0,0210
50,670	432,599	57,451	58,725	50,661	0,0096
50,661	432,398	57,452	58,726	50,665	0,0043
50,665	432,489	57,451	58,726	50,663	0,0020
50,663	432,447	57,452	58,726	50,664	0,0009
50,664	432,466	57,452	58,726	50,663	0,0004
50,663	432,458	57,452	58,726	50,664	0,0002
50,664	432,462	57,452	58,726	50,663	0,0001
50,663	432,460	57,452	58,726	50,664	0,0000
50,664	432,461	57,452	58,726	50,664	0,0000
50,664	432,460	57,452	58,726	50,664	0,0000

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 9. Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 240 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,978	58,388	59,194	54,115	11,615
54,115	506,346	56,954	58,477	48,880	5,235
48,880	395,231	57,622	58,811	51,320	2,440
51,320	446,342	57,315	58,658	50,198	1,122
50,198	422,678	57,457	58,729	50,718	0,520
50,718	433,602	57,392	58,696	50,478	0,240
50,478	428,552	57,422	58,711	50,589	0,111
50,589	430,885	57,408	58,704	50,537	0,051
50,537	429,807	57,414	58,707	50,561	0,024
50,561	430,305	57,411	58,706	50,550	0,011
50,550	430,075	57,413	58,706	50,555	0,005
50,555	430,181	57,412	58,706	50,553	0,002
50,553	430,132	57,413	58,706	50,554	0,001
50,554	430,155	57,412	58,706	50,554	0,000
50,554	430,144	57,412	58,706	50,554	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 235 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,978	58,354	59,177	54,012	11,512
54,012	504,099	56,903	58,452	48,735	5,277
48,735	392,229	57,590	58,795	51,235	2,500
51,235	444,532	57,269	58,635	50,066	1,169
50,066	419,916	57,420	58,710	50,616	0,550
50,616	431,466	57,349	58,675	50,358	0,258
50,358	426,039	57,383	58,691	50,479	0,121
50,479	428,587	57,367	58,683	50,423	0,057
50,423	427,390	57,374	58,687	50,449	0,027
50,449	427,953	57,371	58,685	50,437	0,013
50,437	427,688	57,372	58,686	50,443	0,006
50,443	427,812	57,372	58,686	50,440	0,003
50,440	427,754	57,372	58,686	50,441	0,001
50,441	427,782	57,372	58,686	50,441	0,001
50,441	427,769	57,372	58,686	50,441	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 230 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,978	58,318	59,159	53,904	11,404
53,904	501,765	56,850	58,425	48,586	5,318
48,586	389,150	57,557	58,779	51,148	2,562
51,148	442,682	57,221	58,611	49,930	1,218
49,930	417,064	57,382	58,691	50,513	0,583
50,513	429,286	57,305	58,653	50,235	0,278
50,235	423,446	57,342	58,671	50,368	0,133
50,368	426,234	57,325	58,662	50,304	0,063
50,304	424,903	57,333	58,666	50,334	0,030
50,334	425,539	57,329	58,664	50,320	0,014
50,320	425,235	57,331	58,665	50,327	0,007
50,327	425,380	57,330	58,665	50,324	0,003
50,324	425,311	57,330	58,665	50,325	0,002
50,325	425,344	57,330	58,665	50,324	0,001
50,324	425,328	57,330	58,665	50,325	0,000
50,325	425,335	57,330	58,665	50,325	0,000
50,325	425,332	57,330	58,665	50,325	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 225 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,978	58,281	59,140	53,792	11,292
53,792	499,338	56,796	58,398	48,433	5,360
48,433	385,991	57,523	58,762	51,058	2,626
51,058	440,793	57,172	58,586	49,789	1,270
49,789	414,115	57,343	58,671	50,407	0,618
50,407	427,060	57,260	58,630	50,107	0,300
50,107	420,769	57,300	58,650	50,253	0,146
50,253	423,824	57,281	58,640	50,182	0,071
50,182	422,340	57,290	58,645	50,216	0,034
50,216	423,061	57,285	58,643	50,200	0,017
50,200	422,711	57,288	58,644	50,208	0,008
50,208	422,881	57,287	58,643	50,204	0,004
50,204	422,798	57,287	58,644	50,206	0,002
50,206	422,838	57,287	58,643	50,205	0,001
50,205	422,819	57,287	58,643	50,205	0,000
50,205	422,828	57,287	58,643	50,205	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 220 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,98	58,241	59,121	53,676	11,176
53,676	496,81	56,740	58,370	48,275	5,401
48,275	382,75	57,488	58,744	50,967	2,692
50,967	438,86	57,120	58,560	49,643	1,324
49,643	411,07	57,302	58,651	50,299	0,656
50,299	424,79	57,212	58,606	49,975	0,324
49,975	418	57,257	58,628	50,135	0,160
50,135	421,36	57,235	58,617	50,056	0,079
50,056	419,7	57,246	58,623	50,095	0,039
50,095	420,52	57,240	58,620	50,076	0,019
50,076	420,11	57,243	58,622	50,085	0,010
50,085	420,31	57,242	58,621	50,080	0,005
50,080	420,21	57,242	58,621	50,083	0,002
50,083	420,26	57,242	58,621	50,082	0,001
50,082	420,24	57,242	58,621	50,082	0,001
50,082	420,25	57,242	58,621	50,082	0,000
50,082	420,24	57,242	58,621	50,082	0,000
50,082	420,25	57,242	58,621	50,082	0,000

Fuente: elaboración propia.



Apéndice 14. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 215 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,98	58,201	59,100	53,554	11,054
53,554	494,18	56,682	58,341	48,113	5,441
48,113	379,42	57,452	58,726	50,873	2,760
50,873	436,89	57,066	58,533	49,491	1,382
49,491	407,91	57,261	58,630	50,188	0,697
50,188	422,47	57,163	58,582	49,838	0,350
49,838	415,14	57,212	58,606	50,014	0,176
50,014	418,83	57,188	58,594	49,926	0,089
49,926	416,97	57,200	58,600	49,970	0,045
49,970	417,91	57,194	58,597	49,948	0,022
49,948	417,44	57,197	58,598	49,959	0,011
49,959	417,67	57,195	58,598	49,953	0,006
49,953	417,55	57,196	58,598	49,956	0,003
49,956	417,61	57,196	58,598	49,955	0,001
49,955	417,58	57,196	58,598	49,956	0,001
49,956	417,6	57,196	58,598	49,955	0,000
49,955	417,59	57,196	58,598	49,955	0,000
49,955	417,59	57,196	58,598	49,955	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura e superficie a un caudal de aire de 205 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,98	58,113	59,056	53,295	10,795
53,295	488,58	56,559	58,280	47,775	5,520
47,775	372,5	57,377	58,688	50,680	2,904
50,680	432,8	56,952	58,476	49,171	1,509
49,171	401,25	57,174	58,587	49,960	0,789
49,960	417,7	57,058	58,529	49,549	0,412
49,549	409,11	57,119	58,559	49,764	0,215
49,764	413,59	57,087	58,544	49,651	0,112
49,651	411,25	57,104	58,552	49,710	0,059
49,710	412,47	57,095	58,548	49,679	0,031
49,679	411,83	57,100	58,550	49,695	0,016
49,695	412,16	57,097	58,549	49,687	0,008
49,687	411,99	57,099	58,549	49,691	0,004
49,691	412,08	57,098	58,549	49,689	0,002
49,689	412,03	57,098	58,549	49,690	0,001
49,690	412,06	57,098	58,549	49,690	0,001
49,690	412,05	57,098	58,549	49,690	0,000
49,690	412,05	57,098	58,549	49,690	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 195 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,98	58,016	59,008	53,011	10,511
53,011	482,47	56,428	58,214	47,417	5,594
47,417	365,2	57,296	58,648	50,476	3,058
50,476	428,51	56,827	58,414	48,825	1,651
48,825	394,08	57,082	58,541	49,723	0,898
49,723	412,73	56,944	58,472	49,236	0,486
49,236	402,61	57,019	58,510	49,500	0,264
49,500	408,1	56,979	58,489	49,357	0,143
49,357	405,12	57,001	58,500	49,435	0,078
49,435	406,73	56,989	58,494	49,393	0,042
49,393	405,86	56,995	58,498	49,415	0,023
49,415	406,33	56,992	58,496	49,403	0,012
49,403	406,07	56,994	58,497	49,410	0,007
49,410	406,21	56,993	58,496	49,406	0,004
49,406	406,14	56,993	58,497	49,408	0,002
49,408	406,18	56,993	58,496	49,407	0,001
49,407	406,16	56,993	58,496	49,408	0,001
49,408	406,17	56,993	58,496	49,407	0,000
49,407	406,16	56,993	58,496	49,407	0,000
49,407	406,17	56,993	58,496	49,407	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 185 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,98	57,909	58,954	52,700	10,200
52,700	475,77	56,287	58,144	47,039	5,661
47,039	357,51	57,210	58,605	50,261	3,222
50,261	423,99	56,691	58,346	48,450	1,811
48,450	386,34	56,985	58,493	49,475	1,026
49,475	407,58	56,819	58,410	48,897	0,579
48,897	395,57	56,913	58,457	49,224	0,327
49,224	402,35	56,860	58,430	49,039	0,185
49,039	398,52	56,890	58,445	49,143	0,104
49,143	400,68	56,873	58,437	49,084	0,059
49,084	399,46	56,883	58,441	49,118	0,033
49,118	400,15	56,877	58,439	49,099	0,019
49,099	399,76	56,880	58,440	49,110	0,011
49,110	399,98	56,879	58,439	49,104	0,006
49,104	399,86	56,880	58,440	49,107	0,003
49,107	399,93	56,879	58,440	49,105	0,002
49,105	399,89	56,879	58,440	49,106	0,001
49,106	399,91	56,879	58,440	49,106	0,001
49,106	399,9	56,879	58,440	49,106	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 175 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,98	57,789	58,895	52,356	9,856
52,356	468,39	56,136	58,068	46,639	5,717
46,639	349,41	57,117	58,559	50,033	3,394
50,033	419,21	56,542	58,271	48,041	1,991
48,041	377,95	56,882	58,441	49,218	1,177
49,218	402,24	56,682	58,341	48,526	0,693
48,526	387,91	56,800	58,400	48,934	0,409
48,934	396,35	56,730	58,365	48,694	0,241
48,694	391,37	56,771	58,386	48,836	0,142
48,836	394,31	56,747	58,374	48,752	0,084
48,752	392,58	56,761	58,381	48,801	0,049
48,801	393,6	56,753	58,376	48,772	0,029
48,772	392,99	56,758	58,379	48,789	0,017
48,789	393,35	56,755	58,377	48,779	0,010
48,779	393,14	56,757	58,378	48,785	0,006
48,785	393,26	56,756	58,378	48,782	0,004
48,782	393,19	56,756	58,378	48,784	0,002
48,784	393,23	56,756	58,378	48,782	0,001
48,782	393,21	56,756	58,378	48,783	0,001
48,783	393,22	56,756	58,378	48,783	0,000
48,783	393,21	56,756	58,378	48,783	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 165 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,98	57,655	58,828	51,973	9,473
51,973	460,23	55,973	57,987	46,215	5,758
46,215	340,89	57,017	58,509	49,790	3,575
49,790	414,13	56,376	58,188	47,596	2,194
47,596	368,84	56,773	58,386	48,952	1,357
48,952	396,72	56,529	58,264	48,117	0,835
48,117	379,51	56,679	58,340	48,633	0,516
48,633	390,12	56,587	58,293	48,315	0,318
48,315	383,57	56,644	58,322	48,511	0,196
48,511	387,61	56,608	58,304	48,390	0,121
48,390	385,12	56,630	58,315	48,465	0,075
48,465	386,65	56,617	58,308	48,419	0,046
48,419	385,71	56,625	58,313	48,447	0,028
48,447	386,29	56,620	58,310	48,430	0,017
48,430	385,93	56,623	58,312	48,440	0,011
48,440	386,15	56,621	58,311	48,434	0,007
48,434	386,02	56,622	58,311	48,438	0,004
48,438	386,1	56,622	58,311	48,435	0,003
48,435	386,05	56,622	58,311	48,437	0,002
48,437	386,08	56,622	58,311	48,436	0,001
48,436	386,06	56,622	58,311	48,437	0,001
48,437	386,07	56,622	58,311	48,436	0,000
48,436	386,06	56,622	58,311	48,436	0,000
48,436	386,07	56,622	58,311	48,436	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 155 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,98	57,504	58,752	51,546	9,046
51,546	451,13	55,798	57,899	45,768	5,778
45,768	331,93	56,908	58,454	49,529	3,760
49,529	408,69	56,193	58,097	47,107	2,421
47,107	358,9	56,657	58,329	48,678	1,571
48,678	391,05	56,358	58,179	47,664	1,014
47,664	370,22	56,552	58,276	48,321	0,657
48,321	383,69	56,426	58,213	47,896	0,425
47,896	374,97	56,507	58,254	48,171	0,275
48,171	380,61	56,455	58,227	47,993	0,178
47,993	376,96	56,489	58,244	48,108	0,115
48,108	379,32	56,467	58,233	48,034	0,074
48,034	377,8	56,481	58,241	48,082	0,048
48,082	378,78	56,472	58,236	48,051	0,031
48,051	378,14	56,478	58,239	48,071	0,020
48,071	378,56	56,474	58,237	48,058	0,013
48,058	378,29	56,476	58,238	48,066	0,008
48,066	378,46	56,475	58,237	48,061	0,005
48,061	378,35	56,476	58,238	48,064	0,004
48,064	378,42	56,475	58,238	48,062	0,002
48,062	378,38	56,476	58,238	48,064	0,001
48,064	378,41	56,475	58,238	48,063	0,001
48,063	378,39	56,476	58,238	48,063	0,001
48,063	378,4	56,475	58,238	48,063	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21. **Datos calculados de temperatura de salida y  
Temperatura de superficie a un caudal de aire de 145  
(pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,98	57,332	58,666	51,065	8,565
51,065	440,94	55,610	57,805	45,299	5,767
45,299	322,58	56,788	58,394	49,245	3,946
49,245	402,79	55,990	57,995	46,571	2,674
46,571	348,04	56,535	58,267	48,396	1,825
48,396	385,24	56,164	58,082	47,156	1,240
47,156	359,88	56,417	58,208	48,001	0,845
48,001	377,13	56,245	58,123	47,426	0,575
47,426	365,38	56,362	58,181	47,818	0,392
47,818	373,37	56,282	58,141	47,551	0,267
47,551	367,93	56,337	58,168	47,733	0,182
47,733	371,63	56,300	58,150	47,609	0,124
47,609	369,11	56,325	58,162	47,693	0,084
47,693	370,83	56,308	58,154	47,636	0,057
47,636	369,66	56,319	58,160	47,675	0,039
47,675	370,46	56,311	58,156	47,649	0,027
47,649	369,91	56,317	58,158	47,667	0,018
47,667	370,28	56,313	58,157	47,654	0,012
47,654	370,03	56,316	58,158	47,663	0,008
47,663	370,2	56,314	58,157	47,657	0,006
47,657	370,09	56,315	58,158	47,661	0,004
47,661	370,17	56,314	58,157	47,658	0,003
47,658	370,11	56,315	58,157	47,660	0,002
47,660	370,15	56,315	58,157	47,659	0,001
47,659	370,12	56,315	58,157	47,660	0,001
47,660	370,14	56,315	58,157	47,659	0,001
47,659	370,13	56,315	58,157	47,659	0,000
47,659	370,14	56,315	58,157	47,659	0,000

Fuente: elaboración propia.



Apéndice 22. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 135 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,98	57,134	58,567	50,519	8,019
50,519	429,42	55,408	57,704	44,808	5,712
44,808	312,85	56,654	58,327	48,932	4,124
48,932	396,29	55,762	57,881	45,980	2,952
45,980	336,16	56,405	58,203	48,107	2,127
48,107	379,3	55,944	57,972	46,581	1,526
46,581	348,25	56,276	58,138	47,679	1,099
47,679	370,55	56,037	58,019	46,891	0,789
46,891	354,51	56,209	58,104	47,458	0,568
47,458	366,03	56,086	58,043	47,050	0,408
47,050	357,74	56,174	58,087	47,344	0,293
47,344	363,7	56,111	58,055	47,133	0,211
47,133	359,42	56,156	58,078	47,284	0,152
47,284	362,49	56,123	58,062	47,175	0,109
47,175	360,28	56,147	58,074	47,254	0,078
47,254	361,87	56,130	58,065	47,197	0,056
47,197	360,73	56,142	58,071	47,238	0,040
47,238	361,55	56,133	58,067	47,209	0,029
47,209	360,96	56,140	58,070	47,230	0,021
47,230	361,38	56,135	58,068	47,215	0,015
47,215	361,08	56,139	58,069	47,226	0,011
47,226	361,3	56,136	58,068	47,218	0,008
47,218	361,14	56,138	58,069	47,223	0,006
47,223	361,25	56,137	58,068	47,219	0,004
47,219	361,17	56,138	58,069	47,222	0,003
47,222	361,23	56,137	58,068	47,220	0,002
47,220	361,19	56,137	58,069	47,222	0,001
47,222	361,22	56,137	58,069	47,221	0,001
47,221	361,2	56,137	58,069	47,221	0,001
47,221	361,21	56,137	58,069	47,221	0,001

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. **Datos calculados de temperatura de salida y  
Temperatura de superficie a un caudal de aire de 125  
(pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,98	56,905	58,452	49,894	7,394
49,894	416,3	55,192	57,596	44,300	5,594
44,300	302,86	56,502	58,251	48,578	4,278
48,578	388,99	55,507	57,754	45,330	3,248
45,330	323,2	56,267	58,134	47,811	2,481
47,811	373,24	55,689	57,845	45,924	1,887
45,924	335,05	56,130	58,065	47,364	1,440
47,364	364,12	55,795	57,897	46,268	1,096
46,268	341,94	56,051	58,025	47,104	0,836
47,104	358,83	55,856	57,928	46,467	0,637
46,467	345,95	56,004	58,002	46,953	0,486
46,953	355,77	55,891	57,945	46,583	0,370
46,583	348,29	55,977	57,989	46,865	0,282
46,865	353,99	55,912	57,956	46,650	0,215
46,814	352,95	55,923	57,962	46,689	0,125
46,689	350,43	55,953	57,976	46,784	0,095
46,784	352,35	55,930	57,965	46,712	0,073
46,712	350,89	55,947	57,974	46,767	0,055
46,767	352	55,934	57,967	46,725	0,042
46,725	351,15	55,944	57,972	46,757	0,032
46,757	351,8	55,937	57,968	46,732	0,024
46,732	351,31	55,943	57,971	46,751	0,019
46,737	351,4	55,941	57,971	46,748	0,011
46,739	351,45	55,941	57,970	46,746	0,006
46,746	351,57	55,939	57,970	46,741	0,005
46,745	351,55	55,940	57,970	46,742	0,003
46,742	351,49	55,940	57,970	46,744	0,002
46,744	351,54	55,940	57,970	46,742	0,002
46,742	351,51	55,940	57,970	46,743	0,001
46,743	351,53	55,940	57,970	46,743	0,001
46,743	351,51	55,940	57,970	46,743	0,001

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 115 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,98	56,636	58,318	49,169	6,669
49,169	401,21	54,963	57,482	43,784	5,385
43,784	292,77	56,325	58,162	48,167	4,383
48,167	380,52	55,223	57,611	44,620	3,547
44,620	309,15	56,119	58,059	47,504	2,885
47,504	366,98	55,393	57,696	45,167	2,337
45,167	319,97	55,983	57,992	47,067	1,900
47,067	358,08	55,505	57,752	45,527	1,540
45,527	327,11	55,893	57,947	46,778	1,252
46,778	352,24	55,578	57,789	45,763	1,015
45,763	331,83	55,834	57,917	46,588	0,825
46,588	348,39	55,626	57,813	45,919	0,669
45,919	334,94	55,795	57,898	46,462	0,544
46,462	345,85	55,658	57,829	46,021	0,441
46,021	336,99	55,769	57,885	46,379	0,358
46,379	344,18	55,679	57,840	46,088	0,291
46,088	338,34	55,752	57,876	46,325	0,236
46,325	343,08	55,693	57,846	46,133	0,192
46,133	339,23	55,741	57,871	46,289	0,156
46,289	342,36	55,702	57,851	46,162	0,126
46,162	339,82	55,734	57,867	46,265	0,103
46,265	341,88	55,708	57,854	46,181	0,083
46,181	340,21	55,729	57,864	46,249	0,068
46,249	341,57	55,712	57,856	46,194	0,055
46,194	340,47	55,726	57,863	46,239	0,045
46,239	341,36	55,715	57,857	46,203	0,036
46,203	340,63	55,724	57,862	46,232	0,029
46,232	341,22	55,716	57,858	46,208	0,024
46,208	340,74	55,722	57,861	46,227	0,019
46,227	341,13	55,717	57,859	46,212	0,016
46,212	340,82	55,721	57,861	46,225	0,013
46,225	341,07	55,718	57,859	46,214	0,010

Continuación del apéndice 24.

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
46,214	340,87	55,721	57,860	46,223	0,008
46,223	341,03	55,719	57,859	46,216	0,007
46,216	340,9	55,720	57,860	46,221	0,006
46,221	341,01	55,719	57,859	46,217	0,004
46,217	340,92	55,720	57,860	46,220	0,004
46,220	340,99	55,719	57,860	46,217	0,003
46,217	340,93	55,720	57,860	46,220	0,002
46,220	340,98	55,719	57,860	46,218	0,002
46,218	340,94	55,720	57,860	46,220	0,002
46,220	340,97	55,719	57,860	46,218	0,001
46,218	340,95	55,720	57,860	46,219	0,001
46,219	340,97	55,719	57,860	46,218	0,001
46,218	340,95	55,720	57,860	46,219	0,001
46,219	340,97	55,719	57,860	46,219	0,001
46,219	340,95	55,720	57,860	46,219	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 25. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 105 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error Absoluto (°C)
42,5	267,98	56,315	58,158	48,318	5,818
48,318	383,63	54,725	57,363	43,276	5,042
43,276	282,91	56,110	58,055	47,667	4,390
47,667	370,28	54,909	57,454	43,858	3,809
43,858	294,22	55,955	57,977	47,174	3,316
47,174	360,25	55,047	57,523	44,295	2,879
44,295	302,77	55,837	57,918	46,801	2,506
46,801	352,69	55,151	57,575	44,625	2,176
44,625	309,25	55,748	57,874	46,519	1,894
46,519	346,99	55,229	57,614	44,873	1,646
44,873	314,15	55,681	57,840	46,305	1,432
46,305	342,69	55,288	57,644	45,061	1,244
45,061	317,86	55,630	57,815	46,143	1,083
46,143	339,44	55,333	57,666	45,202	0,941
45,202	320,67	55,591	57,795	46,021	0,819
46,021	336,99	55,367	57,683	45,309	0,712
45,309	322,79	55,562	57,781	45,928	0,619
45,928	335,13	55,392	57,696	45,390	0,538
45,390	324,4	55,540	57,770	45,858	0,468
45,858	333,73	55,411	57,706	45,451	0,407
45,451	325,61	55,523	57,761	45,805	0,354
45,805	332,67	55,426	57,713	45,497	0,308
45,497	326,53	55,510	57,755	45,765	0,268
45,765	331,87	55,437	57,718	45,532	0,233
45,532	327,23	55,501	57,750	45,735	0,202
45,735	331,26	55,445	57,723	45,559	0,176
45,559	327,75	55,493	57,747	45,712	0,153
45,712	330,81	55,451	57,726	45,579	0,133
45,579	328,15	55,488	57,744	45,694	0,116
45,694	330,46	55,456	57,728	45,594	0,101
45,594	328,45	55,484	57,742	45,681	0,088
45,681	330,2	55,460	57,730	45,605	0,076

Continuación del apéndice 25.

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
45,605	328,68	55,481	57,740	45,671	0,066
45,671	330	55,463	57,731	45,614	0,058
45,614	328,85	55,478	57,739	45,664	0,050
45,664	329,85	55,465	57,732	45,620	0,044
45,620	328,98	55,477	57,738	45,658	0,038
45,658	329,74	55,466	57,733	45,625	0,033
45,625	329,08	55,475	57,738	45,654	0,029
45,654	329,65	55,467	57,734	45,629	0,025
45,629	329,16	55,474	57,737	45,651	0,022
45,632	329,21	55,473	57,737	45,648	0,016
45,648	329,54	55,469	57,734	45,634	0,014
45,634	329,25	55,473	57,736	45,646	0,012
45,646	329,5	55,469	57,735	45,636	0,011
45,636	329,29	55,472	57,736	45,645	0,009
45,645	329,47	55,470	57,735	45,637	0,008
45,637	329,31	55,472	57,736	45,644	0,007
45,644	329,45	55,470	57,735	45,638	0,006
45,638	329,33	55,472	57,736	45,643	0,005
45,643	329,44	55,470	57,735	45,639	0,005
45,639	329,34	55,472	57,736	45,643	0,004
45,643	329,42	55,471	57,735	45,639	0,004
45,639	329,35	55,471	57,736	45,642	0,003
45,642	329,42	55,471	57,735	45,639	0,003
45,639	329,36	55,471	57,736	45,642	0,002
45,642	329,41	55,471	57,735	45,640	0,002
45,640	329,37	55,471	57,736	45,641	0,002
45,641	329,4	55,471	57,735	45,640	0,002
45,640	329,37	55,471	57,736	45,641	0,001
45,641	329,4	55,471	57,735	45,640	0,001
45,640	329,38	55,471	57,736	45,641	0,001
45,641	329,4	55,471	57,735	45,640	0,001

Continuación del apéndice 25.

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m2)	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
45,640	329,38	55,471	57,736	45,641	0,001
45,641	329,39	55,471	57,735	45,640	0,001
45,640	329,38	55,471	57,736	45,641	0,001
45,641	329,39	55,471	57,735	45,640	0,000
45,640	329,38	55,471	57,736	45,641	0,000
45,641	329,39	55,471	57,735	45,641	0,000
45,641	329,38	55,471	57,736	45,641	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 26. **Datos calculados de temperatura de salida y temperatura de superficie a un caudal de aire de 95 (pie<sup>3</sup>/min)**

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
42,5	267,98	55,928	57,964	47,304	4,804
47,304	362,89	54,485	57,243	42,807	4,497
42,807	273,87	55,838	57,919	47,025	4,218
47,025	357,22	54,571	57,286	43,075	3,949
43,075	279,04	55,759	57,880	46,780	3,704
46,780	352,26	54,647	57,323	43,310	3,469
43,310	283,58	55,690	57,845	46,564	3,254
46,564	347,92	54,713	57,356	43,516	3,048
43,516	287,57	55,630	57,815	46,375	2,859
46,375	344,11	54,771	57,385	43,697	2,679
43,697	291,08	55,577	57,788	46,209	2,513
46,209	340,77	54,821	57,411	43,855	2,354
43,855	294,16	55,530	57,765	46,063	2,208
46,063	337,83	54,866	57,433	43,994	2,069
43,994	296,87	55,488	57,744	45,935	1,941
45,935	335,26	54,905	57,453	44,116	1,819
44,116	299,25	55,452	57,726	45,822	1,706
45,822	333	54,939	57,470	44,223	1,599
44,223	301,35	55,420	57,710	45,722	1,500
45,722	331,02	54,969	57,485	44,317	1,406
44,317	303,19	55,392	57,696	45,635	1,318
45,635	329,28	54,996	57,498	44,399	1,236
44,399	304,81	55,368	57,684	45,558	1,159
45,558	327,74	55,019	57,510	44,472	1,086
44,472	306,24	55,346	57,673	45,491	1,019
45,491	326,4	55,040	57,520	44,536	0,955
44,536	307,49	55,327	57,663	45,431	0,896
45,431	325,22	55,058	57,529	44,592	0,840
44,592	308,6	55,310	57,655	45,379	0,787
45,379	324,18	55,073	57,537	44,641	0,738
44,641	309,57	55,296	57,648	45,333	0,692



Continuación del apéndice 26.

$T_s$ (inicial) (°C)	$q$ (J/s.m <sup>2</sup> )	$T_o$ (°C)	$T_m$ (°C)	$T_s$ (°C)	Error absoluto (°C)
45,333	323,26	55,087	57,544	44,684	0,649
44,684	310,42	55,283	57,641	45,293	0,609
45,293	322,46	55,100	57,550	44,722	0,571
44,722	311,17	55,271	57,636	45,257	0,535
45,257	321,76	55,110	57,555	44,756	0,502
44,756	311,83	55,261	57,631	45,226	0,470
45,226	321,14	55,120	57,560	44,785	0,441
44,785	312,41	55,252	57,626	45,199	0,414
45,199	320,59	55,128	57,564	44,811	0,388
44,811	312,92	55,245	57,622	45,174	0,364
45,174	320,11	55,135	57,568	44,833	0,341
44,833	313,36	55,238	57,619	45,153	0,320
45,153	319,69	55,142	57,571	44,853	0,300
44,853	313,76	55,232	57,616	45,135	0,281
45,135	319,32	55,147	57,574	44,871	0,264
44,871	314,11	55,227	57,613	45,118	0,247
45,118	319	55,152	57,576	44,886	0,232
44,886	314,41	55,222	57,611	45,104	0,217
45,104	318,71	55,157	57,578	44,900	0,204
44,900	314,68	55,218	57,609	45,091	0,191
45,091	318,46	55,160	57,580	44,912	0,179
44,912	314,91	55,214	57,607	45,080	0,168
45,080	318,24	55,164	57,582	44,922	0,157
44,922	315,12	55,211	57,606	45,070	0,148
45,070	318,04	55,167	57,583	44,932	0,138
44,932	315,3	55,208	57,604	45,061	0,130
45,061	317,87	55,169	57,585	44,940	0,122
44,940	315,46	55,206	57,603	45,054	0,114
45,054	317,72	55,172	57,586	44,947	0,107
44,947	315,6	55,204	57,602	45,047	0,100
45,047	317,59	55,174	57,587	44,953	0,094
44,953	315,73	55,202	57,601	45,041	0,088

Continuación del apéndice 26.

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m2)	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
45,041	317,47	55,175	57,588	44,959	0,083
44,959	315,84	55,200	57,600	45,036	0,078
45,036	317,37	55,177	57,588	44,963	0,073
44,963	315,93	55,199	57,599	45,032	0,068
45,032	317,28	55,178	57,589	44,968	0,064
44,968	316,02	55,197	57,599	45,028	0,060
45,028	317,2	55,179	57,590	44,971	0,056
44,971	316,09	55,196	57,598	45,024	0,053
45,024	317,13	55,181	57,590	44,975	0,049
44,975	316,15	55,195	57,598	45,021	0,046
45,021	317,07	55,181	57,591	44,978	0,043
44,978	316,21	55,195	57,597	45,018	0,041
45,018	317,02	55,182	57,591	44,980	0,038
44,980	316,26	55,194	57,597	45,016	0,036
45,016	316,97	55,183	57,591	44,982	0,034
44,982	316,31	55,193	57,597	45,014	0,031
45,014	316,93	55,184	57,592	44,984	0,030
44,984	316,35	55,192	57,596	45,012	0,028
45,012	316,89	55,184	57,592	44,986	0,026
44,986	316,38	55,192	57,596	45,010	0,024
45,010	316,86	55,185	57,592	44,988	0,023
44,988	316,41	55,192	57,596	45,009	0,021
45,009	316,83	55,185	57,593	44,989	0,020
44,989	316,44	55,191	57,596	45,008	0,019
45,008	316,81	55,185	57,593	44,990	0,018
44,990	316,46	55,191	57,595	45,007	0,017
45,007	316,79	55,186	57,593	44,991	0,016
44,991	316,48	55,190	57,595	45,006	0,015
45,006	316,77	55,186	57,593	44,992	0,014
44,992	316,5	55,190	57,595	45,005	0,013
45,005	316,75	55,186	57,593	44,993	0,012

Continuación del apéndice 26.

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m <sup>2</sup> )	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
44,993	316,51	55,190	57,595	45,004	0,011
45,004	316,74	55,187	57,593	44,993	0,011
44,993	316,53	55,190	57,595	45,003	0,010
45,003	316,72	55,187	57,593	44,994	0,009
44,994	316,54	55,190	57,595	45,003	0,009
45,003	316,71	55,187	57,593	44,995	0,008
44,995	316,55	55,189	57,595	45,002	0,008
45,002	316,7	55,187	57,594	44,995	0,007
44,995	316,56	55,189	57,595	45,002	0,007
45,002	316,69	55,187	57,594	44,996	0,006
44,996	316,57	55,189	57,595	45,001	0,006
45,001	316,68	55,187	57,594	44,996	0,006
44,996	316,58	55,189	57,594	45,001	0,005
45,001	316,68	55,187	57,594	44,996	0,005
44,996	316,58	55,189	57,594	45,001	0,005
45,001	316,67	55,188	57,594	44,996	0,004
44,996	316,59	55,189	57,594	45,001	0,004
45,001	316,67	55,188	57,594	44,997	0,004
44,997	316,59	55,189	57,594	45,000	0,004
45,000	316,66	55,188	57,594	44,997	0,003
44,997	316,6	55,189	57,594	45,000	0,003
45,000	316,66	55,188	57,594	44,997	0,003
44,997	316,6	55,189	57,594	45,000	0,003
45,000	316,65	55,188	57,594	44,997	0,003
44,997	316,6	55,189	57,594	45,000	0,002
45,000	316,65	55,188	57,594	44,997	0,002
44,997	316,61	55,189	57,594	45,000	0,002
45,000	316,65	55,188	57,594	44,998	0,002
44,998	316,61	55,188	57,594	44,999	0,002
44,999	316,65	55,188	57,594	44,998	0,002
44,998	316,61	55,188	57,594	44,999	0,002

Continuación del apéndice 26.

Ts (inicial) (°C)	q (J/s.m2)	To (°C)	Tm (°C)	Ts (°C)	Error absoluto (°C)
44,999	316,64	55,188	57,594	44,998	0,002
44,998	316,61	55,188	57,594	44,999	0,001
44,999	316,64	55,188	57,594	44,998	0,001
44,998	316,62	55,188	57,594	44,999	0,001
44,999	316,64	55,188	57,594	44,998	0,001

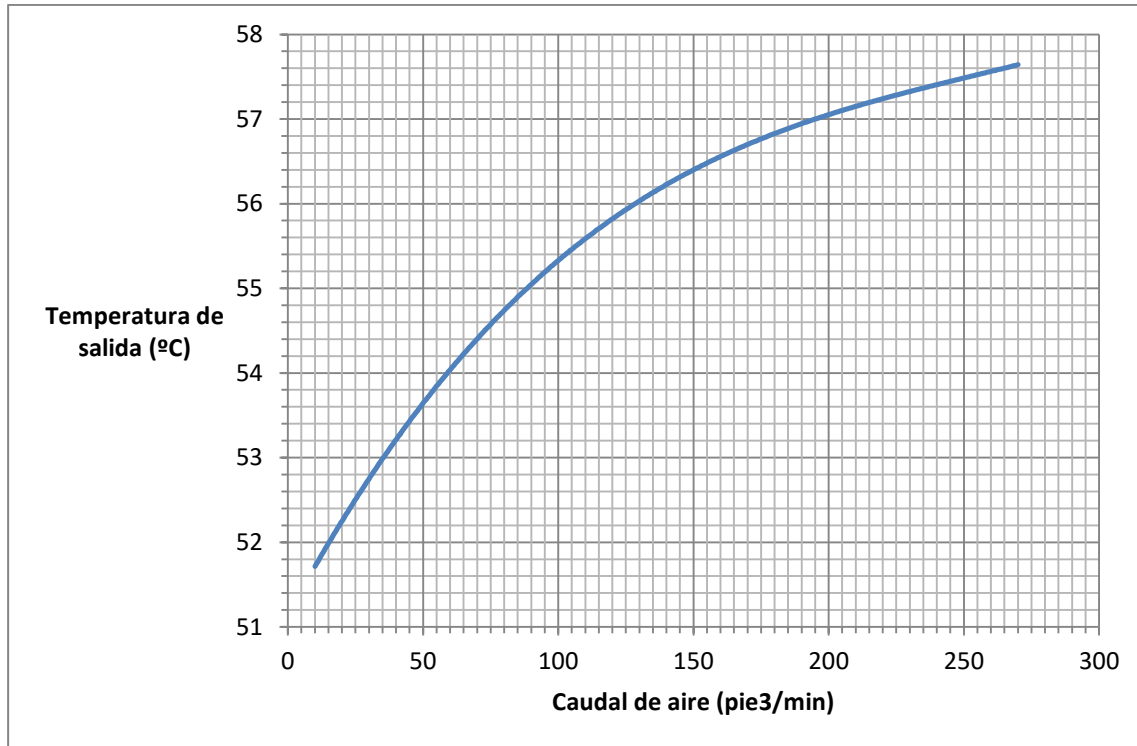
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 27. **Resumen de datos para la temperatura de salida**

Q (pie <sup>3</sup> /min)	To (°C)
90	55,032
95	55,188
105	55,471
115	55,72
125	55,94
135	56,137
145	56,315
155	56,475
165	56,622
175	56,756
185	56,879
195	56,993
205	57,098
215	57,196
220	57,242
225	57,287
230	57,33
235	57,372
240	57,412
245	57,452
250	57,49
255	57,526
260	57,562
265	57,597
270	57,63

Fuente: elaboración propia.

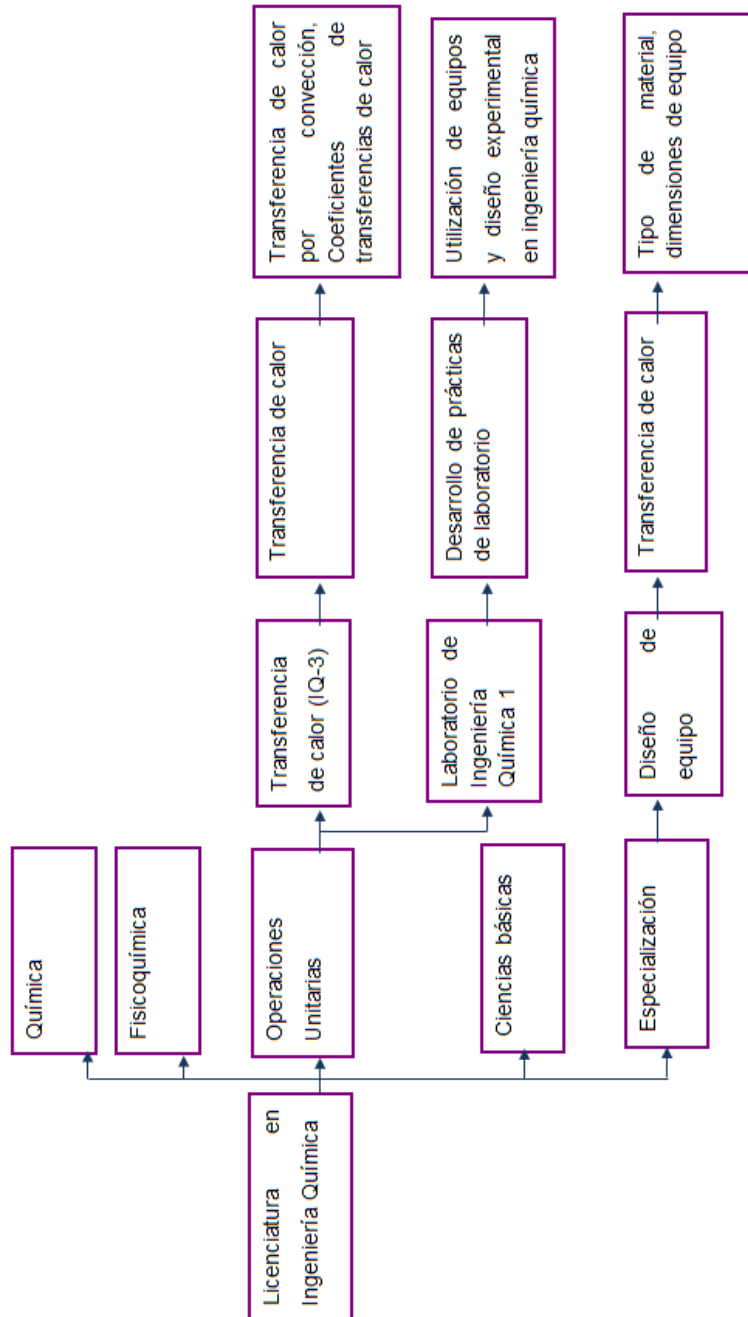
Apéndice 28. **Temperatura de salida del tubo en función del caudal de aire**



Color	Modelo matemático	Correlación (R <sup>2</sup> )
	$y = 3E-07x^3 - 0,0002x^2 + 0,0596x + 51,138$	0,9999

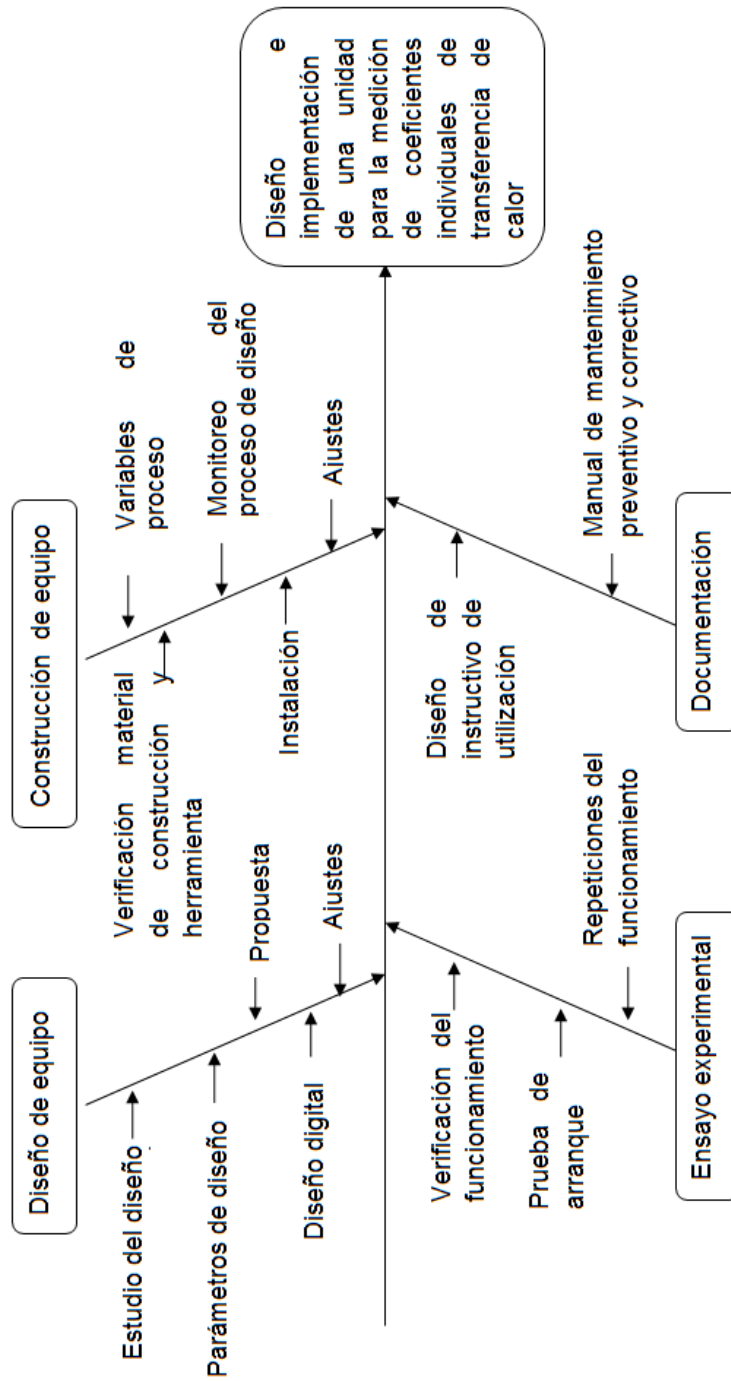
Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 29. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 30. Diagrama de Ishikawa

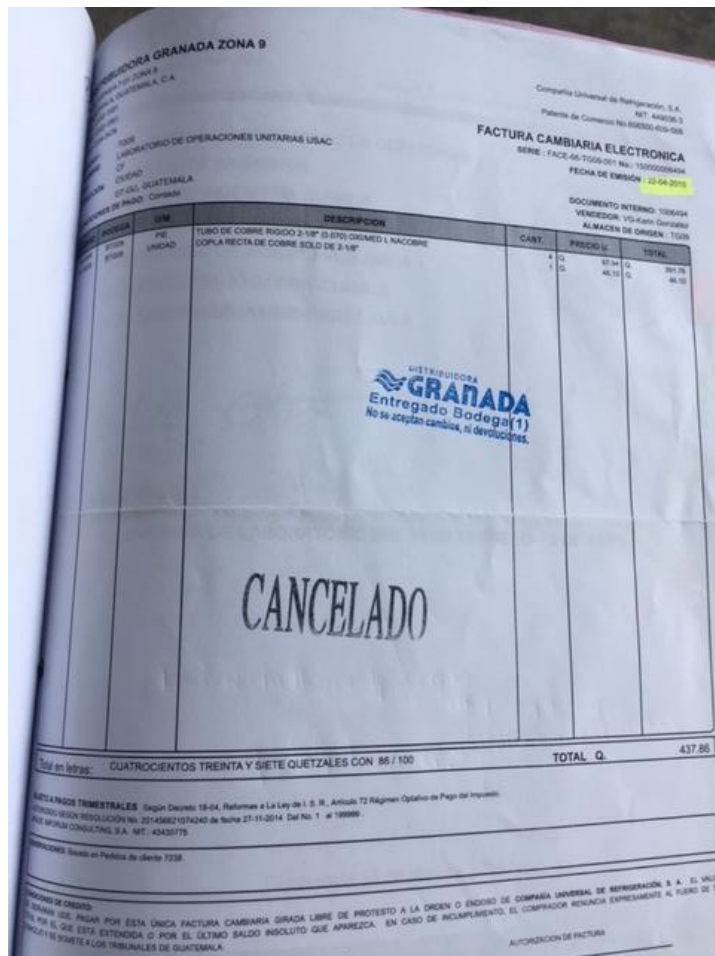


Fuente: elaboración propia.



# ANEXOS

## Anexo 1. Compra de tubería



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias.



Anexo 3. Compra de angular de aluminio

**FACTURA CAMBIARIA**  
SERIE AZ No. **078020** Cheque Rechazado Q.300.00

**MADYMET**  
MADERAS Y METALES, S. A.  
Calle de Alameda 16-05 Zona 12  
PBX: 2285-6000 FAX: 2473-2901  
Guatemala, Guatemala  
ALUMICENTRO UNA DIVISION DE MADYMET

NIT: 490570-0  
PATENTE DE COMERCIO No. 13579-453-69  
MADERAS Y METALES

NOMBRE: LABORATORIO DE OPERACIONES  
DIRECCION: UNITARIAS / CIUDAD  
ENVIAR A:  
CODIGO CLIENTE: CF3

FECHA  
DIA MES AÑO  
7 MARZO 2016

OPCION DEL CLIENTE  
NUMERO DIA MES AÑO  
X

CODIGO	DESCRIPCION	LIBRAS O PIES	PRECIO UNITARIO	VALOR
11D16MF	ANGULO DE 1 X 1 X 1/16	42.00	2.81	118.02
<b>TOTAL Q</b>				<b>118.02</b>

Maderas y Metales S.A.  
**CONTADO CANCELADO**

SE SERVIRAN  
SE SERVIRAN  
SE SERVIRAN

**SUJETO A PAGOS TRIMESTRALES**

RECIBI DE CONFORMIDAD  
MILTON CASTILLO  
AUTORIZADO

NO SE ACEPTAN DEVOLUCIONES

REGUL. FORMULARIOS COMERCIALES DE GUATEMALA, S.A. NIT. 4857808-9 - TEL. 2254-4106 AUTORIZADO SEGUN RESOLUCION No. 2015-5-748-7847 15.000 J. DEL AZ. 86,001 AL AZ. 80,000 DEL 24-03-2015 S.A.T. VENDE: 24-03-2017 OP. 0191127

ORIGINAL-CLIENTE (ADQUIRIENTE)

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Anexo 4. Compra de fibrocemento

**HERMES**  
HERRAMIENTAS MATERIALES Y EQUIPOS, S.A.  
CALZADA AGUILAR BATRES No. 19-23 ZONA 12,  
GUATEMALA, GUATEMALA  
FAX 2327-7200 www.gramhermes.com  
NIT: 438619-0

FACTURA ELECTRONICA  
Serie: FACE-ES-FA-001  
No. 10000001124

República de Guatemala - Tabasco

**DATOS DEL COMPRADOR** **CONTADO**

Nombre: **LAB. OPERACIONES UNITARIAS**  
Código: 02001  
Ciudad:

TELEFONO DEL CLIENTE:  
VENDEDOR: Jose Chacón  
REFERENCIA:

**DESCRIPCIÓN DE LA FACTURA ELECTRÓNICA**

Cantidad	Unidad	Descripción	Precio Unitario	Importe
1.00	UNIDAD	PLASTONE DE 11mm x 4 x 8 LBG Basado en Pedido de cliente 1868.	252.00	252.00

*Herramientas, Materiales y Equipos S.A.*  
*18/09/15*  
*JC*

**SUJETOS A PAGOS TRIMESTRALES**  
SE COBRARÁ Q.100.00 DE GASTOS ADMINISTRATIVOS POR CHEQUE RECHAZADO  
"NO SE ACEPTAN CAMBIOS NI DEVOLUCIONES"

letras: DOSCIENTOS CINCUENTA Y DOS QUETZALES 00/100 **TOTAL GTQ 252.00**

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Anexo 5. Compra de artículos de ferretería

**DISTRIBUIDORA LA FORTUNA**  
Sujeto a Pagos Trimestrales

JULIO CESAR CRUZ OLIVA  
21 Calle 16-13, Zona 12, Guatemala, Guatemala  
Teléfono: 2473-3004 / 2472-7697  
FERRETERIA, MADERAS Y MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN.

**FACTURA SERIE "A"**  
Nº 006148  
NIT: 2016804-7

GUATEMALA, DIA: 12 MES: 10 AÑO: 16

Nombre o Razón Social: Laboratorio Operaciones Unitarias  
Dirección Fiscal: NIT: C/F

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	TOTAL
1	Broca 3/16	13.50
1	Sierra Sanflex	10.00
10	Tornillo 3/16 x 2	4.50
1	Brocha 2	7.70
1	Punta	8.80
		44.50
		<b>TOTAL Q. 44.50</b>

TOTAL EN LETRAS: \_\_\_\_\_

Imprenta LOYOLA • Nit.: 425114-8 Autorización según Res. SAT 2016-5-945-913  
Facturas Serie A del 001 al 20,000 de fecha 30-03-2016 Vigencia hasta 30-03-2017

ORIGINAL: Cliente • DUPLICADO: Contabilidad

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias.

