



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

IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN FORZADA EXTERNA, A TRAVÉS DE TRES GEOMETRÍAS DE SUPERFICIE PLANA, EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Oscar Daniel García Aguilar

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, septiembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN FORZADA EXTERNA, A TRAVÉS DE TRES GEOMETRÍAS DE SUPERFICIE PLANA, EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

OSCAR DANIEL GARCÍA AGUILAR

ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. María Martha Wolford Estrada
EXAMINADOR	Ing. José Francisco Gómez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Selvin Estuardo Joachin Juarez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN FORZADA EXTERNA, A TRAVÉS DE TRES GEOMETRÍAS DE SUPERFICIE PLANA, EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 23 de noviembre de 2018.



Oscar Daniel García Aguilar

Guatemala 26 de febrero de 2020

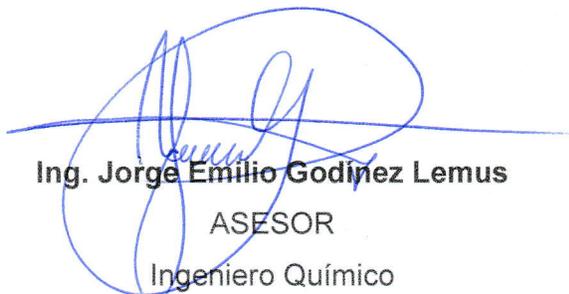
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Williams Guillermo Álvarez Mejía:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el **Informe Final** del trabajo de graduación titulado: "**Implementación de equipo didáctico para el estudio de la transferencia de calor por convección forzada externa, a través de tres geometrías de superficie plana, en el laboratorio de operaciones unitarias de la facultad de Ingeniería de la universidad de San Carlos de Guatemala**", elaborado por el estudiante de la carrera de **Ingeniería Química**, quien se identifica con el registro académico **2010-20472** y con el CUI **2069 82208 0101**.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

ASESOR

Ingeniero Químico

Colegiado activo no. 874



Guatemala, 03 de noviembre de 2020.
Ref. EQ.TG-IF 039 2020.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo 073-2018, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Oscar Daniel García Aguilar**,

Identificado con número de carné: 2069822080101.

Identificado con registro académico: 201020472.

Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.

En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

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:

IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN FORZADA EXTERNA, A TRAVÉS DE TRES GEOMETRÍAS DE SUPERFICIE PLANA, EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Jorge Emilio Godínez Lemus, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido 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"

Otto Raúl De León De Paz
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

OTTO RAUL DE LEÓN DE PAZ
INGENIERO QUÍMICO
COL # 229
CIQG

C.c.: archivo





Guatemala, 24 de septiembre de 2021
Ref. EIQ.189.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN FORZADA EXTERNA, A TRAVÉS DE TRES GEOMETRÍAS DE SUPERFICIE PLANA, EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA** del(la) estudiante Oscar Daniel García Aguilar, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Williams G. Álvarez Mejía, M.I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

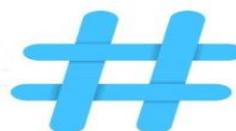
Cc. Archivo
WGAM/wgam



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102

DTG. 458-2021

La Decana 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: **IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN FORZADA EXTERNA, A TRAVÉS DE TRES GEOMETRÍAS DE SUPERFICIE PLANA, EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Oscar Daniel García Aguilar**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, septiembre de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Universo	Por ponerme en el punto exacto del espacio-tiempo en donde poder desarrollar una visión amplia y bella de la vida.
Mis padres	Gilberto García y Miriam Aguilar, este es un logro que sería imposible sin sus enseñanzas y sabiduría.
Mi esposa	Jessica Lauren Strom de García eres mi vida entera.
Mi familia	Ingenieros y artistas de la vida misma, máxima influencia de mi existencia.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una casa de enseñanza abierta para todos los guatemaltecos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y una influencia importante en mi carrera y vida.
Facultad de Ingeniería	Por formarme como ingeniero químico.
Mis amigos de la Facultad	Sergio Mancilla, Javier Romero, Diana Mendoza, Ana de Gandarias.
Docentes	Por formarme un criterio analítico guiado al progreso personal y profesional enfocado en Guatemala y el mundo.
Mis padres	Por brindarme todas las herramientas necesarias para cumplir mis metas sin pedir nada a cambio.
Mi asesor	Jorge Godínez, por su disposición, apoyo y tiempo para cumplir este proyecto.
Jessica García	Por siempre motivarme a alcanzar mi máximo potencial en los proyectos que me propongo.
Mis hermanos	Por ser un ejemplo de vida que guía al bien y al crecimiento personal.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Justificación	3
1.2. Delimitación del problema	6
1.2.1. Definición	7
1.2.2. Delimitación	7
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Calor.....	9
2.1.1. Calor latente	9
2.1.1. Calor sensible	10
2.1.2. Calor de reacción.....	10
2.1.3. Calor eléctrico.....	10
2.2. Termodinámica.....	11
2.3. Transferencia de calor	11
2.4. Mecanismos de transferencia de calor	12
2.4.1. Conducción.....	12
2.4.2. Convección	13
2.4.2.1. Convección natural	14

	2.4.2.2.	Convección forzada.....	14
	2.4.3.	Radiación	15
	2.4.4.	Capa límite	15
	2.4.4.1.	Capa límite de velocidad	16
	2.4.4.2.	Capa límite térmica	17
2.5.		Coeficiente de transferencia de calor	18
	2.5.1.	Coeficiente de transferencia de calor por convección	18
	2.5.2.	Número de Reynolds.....	19
	2.5.2.1.	Flujo laminar.....	20
	2.5.2.2.	Flujo turbulento.....	20
	2.5.2.3.	Flujo de transición	21
	2.5.3.	Número de Prandtl	22
	2.5.4.	Número de Nusselt.....	22
	2.5.5.	Diámetro hidráulico para tubos no circulares	23
2.6.		Flujo paralelo sobre placas planas.....	23
2.7.		Determinación del coeficiente de transferencia de calor convectivo para un flujo paralelo sobre placas planas	24
2.8.		Ventiladores	25
	2.8.1.	Tipos de ventiladores	26
	2.8.2.	Velocidad efectiva del aire.....	26
2.9.		Resistencias eléctricas.....	27
	2.9.1.	Tipos de resistencias eléctricas.....	28
	2.9.1.1.	Resistencias tubulares aletadas.....	28
	2.9.1.2.	Resistencias de inmersión.....	29
	2.9.1.3.	Resistencias tipo abrazaderas	29
3.		DISEÑO METODOLÓGICO.....	31
	3.1.	Variables	31

3.1.1.	Variables independientes	31
3.1.2.	Variables dependientes	31
3.2.	Delimitación de campo de estudio	31
3.2.1.	Ubicación	32
3.3.	Recursos humanos disponibles	32
3.4.	Recursos materiales disponibles	32
3.5.	Técnica cuantitativa y cualitativa	33
3.5.1.	Técnica cualitativa	33
3.5.1.1.	Diseño físico de las placas	33
3.5.2.	Técnica cuantitativa	33
3.5.2.1.	Diseño de la resistencia eléctrica	34
2.5.2.1.1.	Asumiendo valores de temperatura de salida...	34
2.5.2.1.2.	Asumiendo valores de potencia de la resistencia	35
3.5.3.	Operación del equipo	35
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	36
3.6.1.	Datos teóricos para el diseño de la resistencia eléctrica	36
3.6.1.1.	Asumiendo valores de temperatura de salida	37
3.6.1.2.	Asumiendo valor de 750 W de potencia de la resistencia eléctrica	45
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	50
3.7.1.	Caracterización experimental de instrumentos y equipo	50
3.8.	Análisis estadístico	71

4.	RESULTADOS.....	75
4.1.	Diseño de equipo	75
4.1.1.	Plataforma con resistencia eléctrica tipo tubular	75
4.1.2.	Potencia de la resistencia.....	78
4.1.3.	Construcción de las placas planas	78
4.1.4.	Circuito eléctrico.....	80
4.2.	Coefficiente convectivo del equipo	83
4.3.	Instructivo de realización de la práctica.....	85
4.3.1.	Equipo para el estudio de transferencia de calor por convección forzada externa para geometrías planas.....	85
4.3.1.1.	Túnel	85
4.3.1.2.	Placas planas	85
4.3.1.3.	Objetivo general	86
4.3.1.4.	Objetivos específicos	86
4.4.	Manual de usuario.....	87
4.4.1.	Operación.....	87
4.4.2.	Medidas de seguridad y precauciones	89
4.5.	Programa de mantenimiento	91
4.5.1.	Solución de problemas.....	92
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	95
	CONCLUSIONES.....	97
	RECOMENDACIONES	99
	BIBLIOGRAFÍA.....	101
	APÉNDICES.....	103
	ANEXOS.....	111

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Equipo didáctico para el estudio de la transferencia de calor por convección forzada externa impulsado por energía eléctrica.....	4
2.	Diseño preliminar de resistencia eléctrica de calentamiento de superficie plana adaptable al equipo didáctico de estudio de transferencia de calor por convección forzada externa existente.....	5
3.	Resistencia eléctrica de calentamiento de superficie plana adaptable al equipo didáctico de estudio de transferencia de calor por convección forzada externa existente	6
4.	Flujo de calor en una pared plana.....	13
5.	Capa límite sobre una placa plana.....	16
6.	Capa límite térmica sobre una placa plana	18
7.	Flujo laminar, de transición y turbulento.....	21
8.	Resistencia tubular aletada	28
9.	Resistencia de inmersión	29
10.	Resistencia de abrazadera.....	30
11.	Caracterización gráfica de anemómetro.....	51
12.	Temperatura de superficie de placa plana de dos caras de calentamiento.....	52
13.	Temperatura de superficie de placa plana de una cara de calentamiento.....	53
14.	Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 0,303 m/s	54

15.	Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 0,555 m/s	55
16.	Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 0,808 m/s	56
17.	Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 1,060 m/s	57
18.	Plataforma, aislante térmico y resistencia eléctrica	76
19.	Placas planas adaptables a la plataforma	77
20.	Diseño preliminar de plataforma, resistencia eléctrica y placa plana adaptable a la plataforma	77
21.	Plataforma y resistencia.....	78
22.	Construcción de placa plana de dos caras de calentamiento	79
23.	Construcción de circuito eléctrico	80
24.	Diagrama eléctrico de circuito.....	81
25.	Coeficiente convectivos de transferencia de calor para placas planas de dos caras de calentamiento (2CC), una cara de calentamiento posición superior (1CCS) y una cara de calentamiento posición inferior (1CCI) según flujo másico del aire	84

TABLAS

I.	Parámetros dimensionales del túnel y placas planas	37
II.	Propiedades del aire a la temperatura promedio	38
III.	Número de Reynolds para las diferentes temperaturas de salida y a la velocidad de trabajo	39
IV.	Coeficiente convectivo, temperatura de la placa y potencia de la resistencia para una velocidad de aire de 0,200 m/s.....	40
V.	Coeficiente convectivo, temperatura de la placa y potencia de la resistencia para una velocidad de aire de 0,375 m/s.....	41

VI.	Coeficiente convectivo, temperatura de la placa y potencia de la resistencia para una velocidad de aire de 0,550 m/s.	42
VII.	Coeficiente convectivo, temperatura de la placa y potencia de la resistencia para una velocidad de aire de 0,725 m/s.	43
VIII.	Coeficiente convectivo, temperatura de la placa y potencia de la resistencia para una velocidad de aire de 0,900 m/s.	44
IX.	Coeficiente convectivo y temperatura de superficie de la placa para una velocidad de aire de 0,200 m/s	45
X.	Coeficiente convectivo y temperatura de superficie de la placa para una velocidad de aire de 0,375 m/s	46
XI.	Coeficiente convectivo y temperatura de superficie de la placa para una velocidad de aire de 0,550 m/s	47
XII.	Coeficiente convectivo y temperatura de superficie de la placa para una velocidad de aire de 0,725 m/s	48
XIII.	Coeficiente convectivo y temperatura de superficie de la placa para una velocidad de aire de 0,900 m/s	49
XIV.	Caracterización de anemómetro	50
XV.	Temperatura de superficie de placa plana de dos caras de calentamiento.....	52
XVI.	Temperatura de superficie de placa plana de una cara de calentamiento.....	53
XVII.	Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 0,303 m/s	54
XVIII.	Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 0,555 m/s	55
XIX.	Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 0,808 m/s	56
XX.	Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 1,060 m/s	57

XXI. Valores de operación a velocidad de 0,303 m/s 58

XXII. Valores de operación a velocidad de 0,555 m/s 58

XXIII. Valores de operación a velocidad de 0,808 m/s 58

XXIV. Valores de operación a velocidad de 1,060 m/s 59

XXV. Coeficiente de transferencia de calor de placa plana de dos caras de calentamiento a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,303 m/s 59

XXVI. Coeficiente de transferencia de calor de placa plana de dos caras de calentamiento a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,555 m/s 60

XXVII. Coeficiente de transferencia de calor de placa plana de dos caras de calentamiento a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,808 m/s 61

XXVIII. Coeficiente de transferencia de calor de placa plana de dos caras de calentamiento a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 1,060 m/s 62

XXIX. Coeficiente de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición superior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,303 m/s 63

XXX. Coeficiente de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición superior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,555 m/s 64

XXXI. Coeficiente de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición superior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,808 m/s 65

XXXII. Coeficiente de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición superior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 1,060 m/s 66

XXXIII.	Coeficiente de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición inferior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,303 m/s	67
XXXIV.	Coeficiente de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición inferior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,555 m/s	68
XXXV.	Coeficiente de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición inferior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,808 m/s	69
XXXVI.	Coeficiente de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición inferior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 1,060 m/s	70
XXXVII.	Promedio y desviación estándar para la placa plana de dos caras de calentamiento	72
XXXVIII.	Promedio y desviación estándar para la placa plana de una cara de calentamiento en posición superior	73
XXXIX.	Promedio y desviación estándar para la placa plana de una cara de calentamiento en posición inferior	74
XL.	Costo de construcción de equipo	82
XLI.	Temperatura de salida y coeficientes convectivos de transferencia de calor para placas planas de dos caras de calentamiento (2CC), una cara de calentamiento posición superior (1CCS) y una cara de calentamiento posición inferior (1CCI) según flujo másico del aire	83
XLII.	Frecuencia de mantenimiento preventivo del equipo	91

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Att	Área transversal de transferencia del túnel
As	Área superficial de transferencia de calor
Cp	Calor específico
h	Coefficiente individual de transferencia de calor
k	Conductividad térmica
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
ρ	Densidad del fluido (kg/m ³)
D	Diámetro
D_{eq}	Diámetro equivalente
ϵ	Emisividad
Q	Flujo de calor
\dot{m}	Flujo másico
°C	Grados Celsius
K	Grados Kelvin
J	Jules/Julios
kg	Kilogramos
L	Longitud de la placa
m	Metro
min	Minutos
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Re	Número de Reynolds
T	Temperatura

T_{ENT}	Temperatura de entrada
T_{SAL}	Temperatura de salida
T_o	Temperatura de salida
T_s	Temperatura de la superficie
T_f	Temperatura promedio
V	Velocidad del flujo del fluido
μ	Viscosidad dinámica
W	Watt

GLOSARIO

Conductividad Térmica	Es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor.
Emisividad	Capacidad de un material para emitir energía radiante.
Epoxi	También llamado resina, es un polímero termoestable que se endurece al combinarse con un catalizador (generalmente).
Fusible	Hilo o chapa metálica que se coloca en algunas partes de las instalaciones eléctricas, para que, cuando la corriente sea excesiva, la interrumpa fundiéndose.
LCD	Es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en colores monocromos.
Resistencia	Elemento que se intercala en un circuito para modificar el paso de la corriente o para producir calor.
SketchUp	Es un programa de diseño gráfico y modelado en tres dimensiones (3D) basado en caras.
Termocuplas	Sensores de temperatura eléctricos más utilizados en la industria.

Voltaje

Cantidad de voltios que actúan en un aparato o sistema eléctrico.

RESUMEN

El Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala cuenta con un equipo para el estudio de coeficientes de transferencia de calor por convección forzada externa que funciona con resistencias eléctricas y un flujo de aire inducido por un ventilador que es impulsado por energía eléctrica. Este equipo está a la disposición de los estudiantes como alternativa a los equipos de arreglos tubulares que funcionan por medio de vapor de caldera y que dependen del consumo de combustibles fósiles.

El presente proyecto tuvo como propósito la complementación y ampliación del estudio de transferencia de calor por convección forzada externa del equipo mencionado en geometrías planas, a través del diseño y fabricación de dos placas planas que transmiten calor por medio de una resistencia eléctrica. Una de estas puede posicionarse de dos maneras obteniendo un total de tres geometrías planas de estudio.

Se fabricó una resistencia de calefacción de tipo tubular para la construcción del equipo. Las estructuras planas están hechas de lámina galvanizada y diseñadas acorde al tamaño del equipo existente. El proyecto se edificó con herramientas personales y materiales adquiridos por proveedores locales. Se encontró que la temperatura de salida del aire es inversamente proporcional al flujo másico de aire inducido que alcanza un máximo de 37,55 °C para la configuración de dos caras de calentamiento y 32,10 °C para una sola cara.

OBJETIVOS

General

Implementar un equipo didáctico que permita determinar coeficientes convectivos para el estudio de la transferencia de calor por convección forzada externa sobre tres diferentes configuraciones geométricas planas.

Específicos

1. Diseñar dos mecanismos que permitan el estudio de transferencia de calor por convección forzada externa a través de una placa plana con una cara de calentamiento y otra de dos caras.
2. Fabricar las resistencias eléctricas de geometría plana que conforman el equipo.
3. Comprobar el adecuado funcionamiento del equipo instalado a través de la calibración de este.
4. Elaborar un manual de usuario y un programa de mantenimiento del equipo instalado.

HIPÓTESIS

Es posible diseñar y construir un equipo que permita la medición de coeficientes de transferencia de calor por convección forzada externa utilizando aire como fluido desplazado, sobre resistencias eléctricas de geometría plana en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

INTRODUCCIÓN

El calor es el tipo de energía que se manifiesta a través de la temperatura en un sistema en equilibrio. La razón de cambio de temperatura en un sistema que pasa de un estado de equilibrio a otro se conoce como transferencia de calor¹.

Los tres mecanismos básicos de la transferencia de calor son: conducción, radiación y convección. El estudio del fenómeno de transferencia de calor es de especial interés en el campo de la ingeniería ya que la cuantificación y manipulación de las variables involucradas en el fenómeno favorecen una gran variedad de procesos de producción industrial.

El presente proyecto se centraliza en la convección forzada externa en geometrías de superficie plana, transferencia de energía térmica interna o sensible entre una superficie sólida y un fluido; en este caso aire, interactuando entre sí a través de su desplazamiento inducido por medio de un ventilador.

La caracterización del fenómeno se estudia a través del coeficiente de transferencia de calor por convección, parámetro determinado experimentalmente cuyo valor depende de las propiedades del fluido, el flujo de este y la geometría de la superficie sólida de interacción.

¹ CENGEL, Yunus, GHAJAR, Afshin. *Transferencia de calor y masa*. p. 2.

1. ANTECEDENTES

Con el objetivo de estudiar la transferencia de calor en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se diseñaron e implementaron diferentes equipos para prácticas experimentales.

El Laboratorio de Operaciones Unitarias cuenta con un equipo didáctico para el estudio de los coeficientes de transferencia de calor por convección forzada externa que trabaja con energía eléctrica presentado como trabajo de graduación de pregrado en ingeniería química en la Universidad de San Carlos de Guatemala, titulado *Diseño e implementación de equipo didáctico para el estudio de la transferencia de calor por convección forzada externa, a través de tres geometrías, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala*².

También se cuenta con un equipo didáctico para el estudio de coeficientes de transferencia de calor por convección forzada interna que funciona con energía eléctrica presentado en el trabajo 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*³.

² SOLARES, María. *Diseño e implementación de equipo didáctico para el estudio de la transferencia de calor por convección forzada externa, a través de tres geometrías, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala*. p. 99.

³ HERNANDEZ, Karen. *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*. p. 39.

Ambos trabajos se desarrollaron con el objetivo de disponer de equipos didácticos para el estudio de coeficientes individuales de transferencia de calor que no dependan del consumo de combustibles fósiles y estén a la disposición inmediata de los estudiantes de ingeniería química.

Se desarrolla un control automatizado con el objetivo de mejorar la precisión de los datos de la práctica experimental, concluyendo: “La implementación de un sistema de control automático dará como consecuencia una mejora en la toma de los resultados por el alto grado de exactitud de los 3 equipos, además la relación que el estudiante tendrá con este tipo de equipos será de una relevancia significativa en su futuro profesional”⁴.

Se desarrolla el diseño y construcción de un equipo para el estudio de la transferencia de calor dos intercambiadores de calor de tubos concéntricos para: “poner en práctica y aprovechar los recursos con que se dispone, para lograr la construcción y montaje de los intercambiadores de calor en el Laboratorio de Operaciones Unitarias”⁵ de la Universidad de San Carlos de Guatemala, los equipos aún se encuentran en el Laboratorio de Operaciones Unitarias y siguen a disposición de los estudiantes de ingeniería química.

⁴ CERESO, David. *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*. p. 153.

⁵ GÓMEZ, Luis. *Dimensionamiento, construcción y evaluación de dos intercambiadores de calor de tubos concéntricos, fabricados con mano de obra y tecnología disponible en Guatemala*. p. 17.

1.1. Justificación

Actualmente la mayoría de las prácticas de la transferencia de calor en Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala se realizan con equipos que trabajan con vapor de caldera, esto representa un consumo y dependencia de combustibles fósiles y, por tanto, un costo elevado por práctica.

El laboratorio también cuenta con dos equipos didácticos que utilizan resistencias eléctricas como aporte calorífico y aire inducido como fluido desplazado, que fueron diseñados y construidos como proyecto final de graduación de pregrado de estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, uno de estos destinado para el estudio de coeficientes convectivos internos y otro para externos, sin embargo, estos equipos limitan la práctica a configuraciones geométricas de arreglos cilíndricos.

Debido a que los intercambiadores de calor de placas, comparados con los de carcasa y tubos, tienen mayor eficiencia en la transferencia de calor⁶, para cubrir la necesidad del estudio práctico de geometrías de superficies planas se realizó el proyecto de ampliación del equipo existente de convección forzada externa (figura 1) a través del diseño y construcción de dos placas planas (figura 2 y 3), una de estas se puede posicionar de dos maneras, para un total de tres geometrías de superficie plana. Esto contribuye al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala con una práctica nueva y verificada, extendiendo el conocimiento teórico y práctico acerca de las geometrías de este tipo, para los estudiantes de la carrera de ingeniería química.

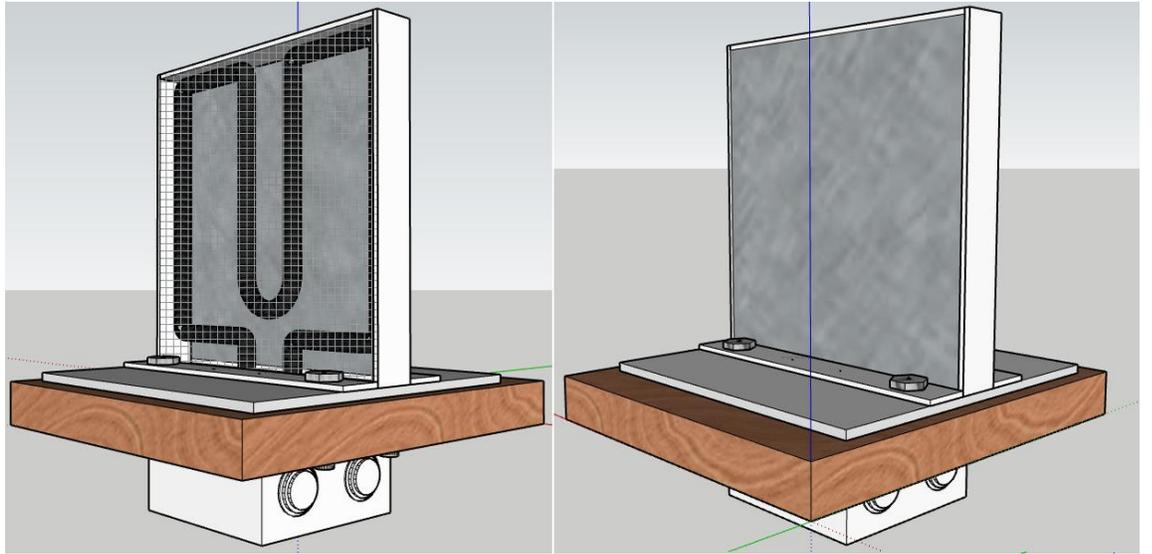
⁶ TORRES, Enrique et al. *Coefficientes de transferencia de calor y pérdida de eficiencia en intercambiadores de calor de placas durante el enfriamiento de licor amoniacal*. p. 69.

Figura 1. **Equipo didáctico para el estudio de la transferencia de calor por convección forzada externa, impulsado por energía eléctrica**



Fuente: elaboración propia, fotografía Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 2. **Diseño preliminar de resistencia eléctrica de calentamiento de superficie plana adaptable al equipo didáctico de estudio de transferencia de calor por convección forzada externa existente**



Fuente: elaboración propia, empleando Sketchup 2018.

Figura 3. **Resistencia eléctrica de calentamiento de superficie plana adaptable al equipo didáctico de estudio de transferencia de calor por convección forzada externa existente**



Fuente: elaboración propia, fotografía Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

1.2. Delimitación del problema

El enfoque de este proyecto se encuentra en extender el material de estudio disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala aportando un equipo para el estudio de la transferencia de calor a través de placas planas. La transferencia.

1.2.1. Definición

El Laboratorio de Operaciones Unitarias no cuenta con un equipo para la medición de coeficientes de transferencia de calor por convección forzada externa para geometrías de superficies planas y que tampoco dependa del consumo de combustibles fósiles para producción de vapor de caldera.

El presente documento describe la implementación de tres geometrías de superficie plana adaptables al equipo didáctico existente (figura 1) para el estudio de la transferencia de calor por convección forzada externa en el Laboratorio de Operaciones Unitarias el cual trabaja por medio de energía eléctrica.

1.2.2. Delimitación

Se diseñó, fabricó e implementó una resistencia eléctrica de tipo tubular montada en una base adaptable al equipo didáctico del estudio de transferencia de calor por convección forzada del Laboratorio de Operaciones Unitarias. Se elaboraron dos placas planas adaptables a dicha base. Una cuenta con dos caras de calentamiento y la otra, solo con una cara de calentamiento. Esta última puede rotar su posición para un total de tres geometrías de superficie plana, que serán utilizadas para el estudio de coeficientes de transferencia de calor por convección forzada externa contra un flujo paralelo de aire inducido.

La base y placa plana instalada se adaptan al equipo didáctico para el estudio de la transferencia de calor por convección forzada externa, el cual se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Calor

Se conoce como calor a la energía térmica o energía calorífica capaz de ser transferida de un sistema a otro como resultado de un diferencial de temperatura⁷. La ciencia que estudia la determinación de razón de la transferencia de este tipo de energía se conoce como transferencia de calor.

Existen diferentes tipos de energía térmica en la naturaleza:

- Calor latente
- Calor sensible
- Calor de reacción
- Calor eléctrico

2.1.1. Calor latente

Es la energía térmica que se aporta a un sistema durante su cambio de estado físico, es decir, cuando un material transita de sólido a líquido. Este no presenta incremento en su temperatura, únicamente se aprecia el cambio de la condición física, sin embargo, existe un aporte energético constante para que todo el material cambie de estado, de la misma manera para la transición de líquido a gaseoso.

⁷ CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 17.

2.1.2. Calor sensible

Es el calor que se aporta a un material y que se ve representado por un incremento de temperatura en este.

2.1.3. Calor de reacción

También conocida como entalpía de reacción química, es la energía liberada o absorbida derivada de una reacción química entre los reactivos y el sistema involucrado.

El cambio químico se realiza cuando las moléculas cambian sus enlaces entre diferentes elementos para formar nuevos compuestos químicos, esto provoca que la energía contenida en estos enlaces sea liberada hacia el sistema, donde estos están contenidos o son absorbidos por el sistema hacia los nuevos elementos (productos). Esto se presenta como un incremento o decaimiento de la temperatura, respectivamente en el sistema.

2.1.4. Calor eléctrico

Es la energía térmica expresada en un sistema como un incremento de temperatura causado por el tránsito de electrones a través de un material conductor.

También conocido como efecto Joule, es la transformación de la energía cinética de los electrones en energía térmica al momento de impactar estos con los átomos o moléculas del material conductor.

2.2. Termodinámica

Es la ciencia que estudia la determinación de la cantidad de transferencia de calor de cualquier sistema que pasa por un proceso, de un estado de equilibrio, a otro.

Los análisis termodinámicos se ven limitados hasta cierto punto debido a que solo podemos determinar cuánto calor debe ser transferido para que se realice un cambio específico con el fin de satisfacer el principio de la conservación de la energía.

Es por esta razón que, para procesos productivos industrializados, es decir para la ingeniería, se ve la necesidad del estudio de la transferencia de calor, tomando en cuenta el tiempo que transcurre durante esta.

2.3. Transferencia de calor

Es el estudio del desplazamiento o traslado de energía térmica entre dos sistemas a través del tiempo. La fuerza impulsora para que esta transferencia energética suceda es un gradiente de temperatura entre estos. Según el primer y segundo principio de la termodinámica, el calor se transfiere desde el sistema con mayor temperatura hacia el que tiene una menor, hasta encontrar el equilibrio.

El calor puede ser transferido por conducción, convección y radiación o por cualquier combinación de estos. La transferencia para los primeros dos se debe en esencia a la interacción entre las partículas de ambos sistemas transfiriendo por impacto la energía térmica entre ellas. El tercer tipo de transferencia se debe a la irradiación energética de un sistema a otro a través del espacio.

2.4. Mecanismos de transferencia de calor

Como se mencionó anteriormente el calor puede ser transferido por tres mecanismos; conducción, convección y radiación.

2.4.1. Conducción

Proceso en el que se transfiere parte de la energía traslacional y vibracional almacenada entre las partículas adyacentes de un sistema de mayor temperatura, hacia las partículas de otro sistema de menor temperatura, en donde ambos sistemas se encuentran en reposo, es decir, sin movimientos masivos.

La dirección de la transferencia de calor se da en ángulos rectos. A través de la ley de *Fourier* es posible cuantificar la transferencia de calor en términos de ecuaciones de velocidad entre ambos sistemas.

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Donde:

\dot{Q} = Flujo de calor (W)

k = Conductividad térmica ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$)

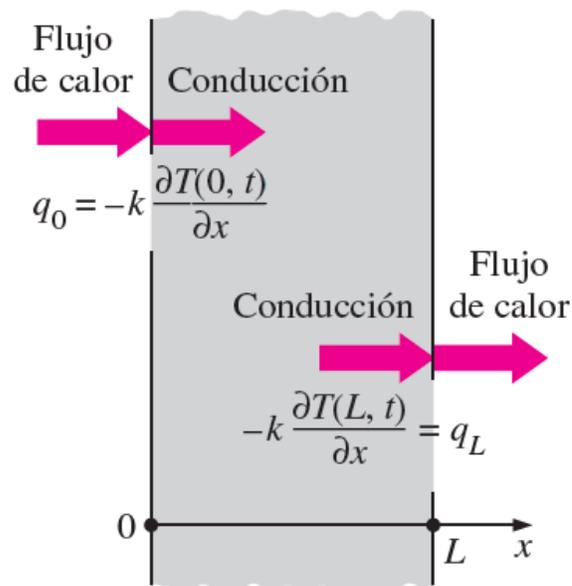
A = Área de transferencia (m²)

$\frac{dT}{dx}$ = Gradiente de temperatura

El calor es conducido en la dirección hacia el sistema de menor temperatura, por esta razón el signo negativo de la ecuación.

En la figura 4 se encuentra un sistema separado por una pared, donde el calor es transferido del lado izquierdo hacia el derecho, a través de la pared de por medio. La conducción toma lugar entre las partículas adyacentes del lado izquierdo y el límite de la pared, el interior de la misma y, finalizando con el límite derecho de la pared y el sistema adyacente del mismo lado.

Figura 4. **Flujo de calor en una pared plana**



Fuente: CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 80.

2.4.2. Convección

Es el mecanismo de transferencia que se da cuando existe movimiento macroscópico de un fluido, un gas o un líquido, en el que se transmite o recibe energía calorífica de un sólido, donde este colisiona.

La transferencia de calor por convección puede ser natural o forzada. A continuación, se explica la diferencia entre ambas.

2.4.2.1. Convección natural

Al igual que en la conducción, parte de la energía traslacional y vibracional almacenada entre las partículas de un sistema de mayor temperatura es transferida hacia las partículas de otro de menor temperatura. Sin embargo, en la convección natural existe un flujo másico de uno de los sistemas que resulta de la diferencia de temperaturas del fluido, ocasionando un diferencial de densidad en este, que, en presencia de una fuerza gravitacional provoca el movimiento del gas y por lo tanto, la colisión de moléculas entre el gas y el sólido.

Tomando en cuenta un sistema sólido isotérmico y un gas como fluido externo homogéneo podemos analizar dos escenarios; en el primero, el sólido se encuentra a mayor temperatura y la energía es transmitida de este hacia el gas y de este hacia el sólido. El segundo escenario, el fenómeno de transferencia de calor se da durante la colisión de partículas en movimiento libre, debido a la energía de traslación y vibración almacenada en las moléculas del gas que chocan directamente con el sólido estático.

2.4.2.2. Convección forzada

La convección forzada se desarrolla de la misma manera que la convección natural, con la diferencia que en esta existe un mecanismo impulsor del fluido que acelera su movimiento, forzando la colisión de las moléculas con el sólido y aumentando la transferencia de calor entre ambos.

Debido a que la razón de transferencia energética está dada por la cantidad de colisiones entre el fluido y el sólido, para la cuantificación de la convección natural y forzada, se deben de tomar en cuenta las propiedades del fluido que

influyen en su comportamiento, viscosidad dinámica (μ), conductividad térmica (k), densidad (ρ), calor específico (C_p) y la velocidad del fluido (V).

La convección se modela matemáticamente por la ley de enfriamiento de Newton descrita como ecuación de la siguiente manera:

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

Donde:

\dot{Q} = Flujo de calor (W)

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

A_s = Área superficial de contacto (m^2)

T_s = Temperatura de la superficie ($^\circ C$)

T_∞ = Temperatura del fluido circundante ($^\circ C$)

2.4.3. Radiación

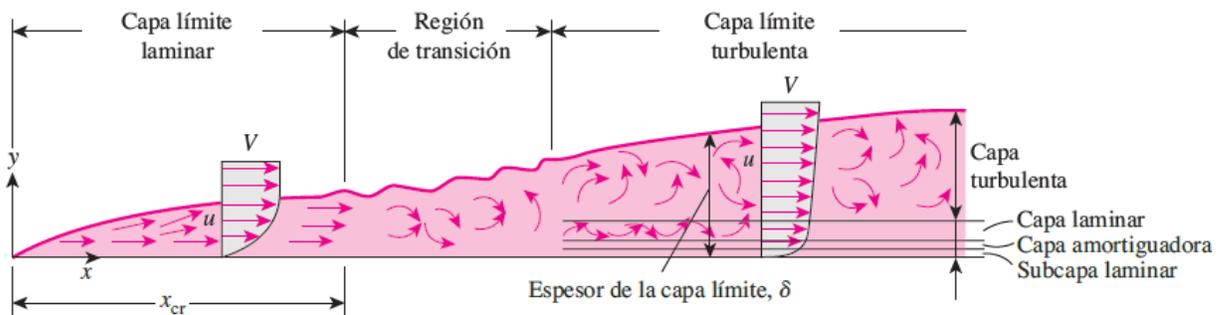
Este tipo de transferencia energética se manifiesta en forma de ondas electromagnéticas desprendidas de un sistema irradiante que viajan a través del espacio e impactan en las moléculas de otro sistema las cuales absorben y almacenan esta energía en forma de energía de traslación y vibración.

2.4.4. Capa límite

Cuando un fluido es desplazado sobre un sólido, se genera una condición de no deslizamiento por fricción que se debe a la viscosidad del fluido. Esto provoca un comportamiento característico sobre la superficie del sólido donde se

encuentran regímenes de fluido de tipo laminar, de transición y turbulentos, a este efecto se le conoce como capa límite.

Figura 5. **Capa límite sobre una placa plana**



Fuente: CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 381.

2.4.4.1. **Capa límite de velocidad**

Podemos figurar el fluido adyacente a una placa plana como capas apiladas una sobre otra, la capa sobre la placa permanecerá inmóvil debido a la condición de no desplazamiento provocada por la adición de partículas sobre el sólido. En la siguiente capa la velocidad se verá retardada por la que está inmóvil, esta capa tendrá un efecto retardante sobre la tercera capa y así sucesivamente hasta llegar a una distancia determinada perpendicular al fluido donde el desplazamiento de las partículas será libre.

Este efecto es el responsable del comportamiento del fluido como flujo laminar, de transición y turbulento adyacente a la placa, como se puede observar en la figura 2, más adelante se explican estos regímenes de fluido.

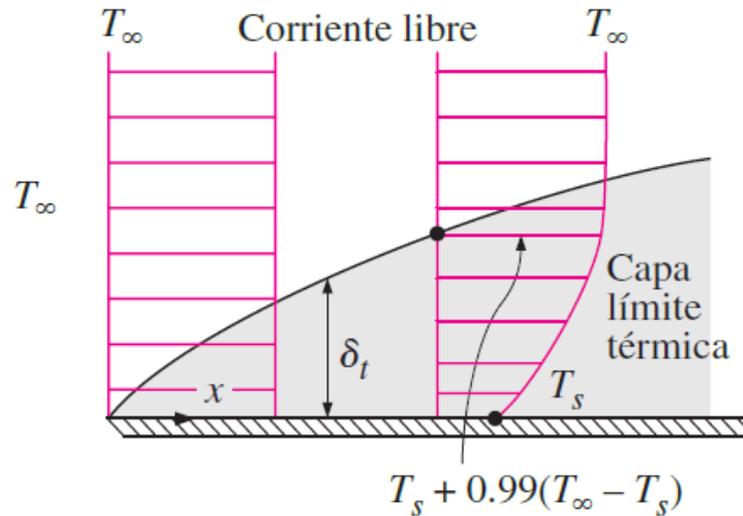
2.4.4.2. Capa límite térmica

De manera similar a la capa límite de velocidad, el comportamiento de la transferencia de calor se transmite desde la capa inmóvil adyacente al sólido, hasta la sección del fluido en desplazamiento libre.

Para el caso de la placa plana y tomando esta como una placa isotérmica a diferente temperatura que el fluido, podemos imaginar que las partículas inmóviles adyacentes llegan al equilibrio térmico y se da un intercambio energético entre las partículas del fluido que están en la capa adjunta, transfiriendo el calor de una capa a otra.

A consecuencia de este efecto se desarrolla un perfil que caracteriza el comportamiento desde la temperatura de superficie del sólido y la capa estática del fluido, hasta la temperatura del fluido. La región del flujo donde la variación de la temperatura es significativa se conoce como la capa límite térmica.

Figura 6. **Capa límite térmica sobre una placa plana**



Fuente: CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 383.

2.5. Coeficiente de transferencia de calor

Representa la razón por la que la energía térmica es transferida de un sistema a otro y debido a su complejidad analítica debe ser determinado de forma experimental, tomando en cuenta las propiedades de los fluidos o sólidos involucrados.

2.5.1. Coeficiente de transferencia de calor por convección

Es un término constante que únicamente puede ser evaluado de forma experimental y sobre el cual tiene influencia las propiedades del fluido. Estas son las que definen directamente la razón de la transferencia energética.

El fenómeno de transferencia de calor por convección se estudia de forma práctica obteniendo como resultado una representación matemática de

ecuaciones empíricas que se expresan en función de los grupos de números adimensionales, Reynolds, Prandtl y Nusselt.

2.5.2. Número de Reynolds

El número de Reynolds fue propuesto por sir Osborne Reynolds en 1883, este propone una caracterización de las condiciones de flujo de los fluidos tomando en cuenta la relación entre las fuerzas inerciales y las viscosas del volumen de este, identificándolo como laminar o turbulento.

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}}$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido ($\frac{kg}{m^3}$)

V = Velocidad media del fluido ($\frac{m}{s}$)

D = longitud o diámetro característico (m)

μ = Viscosidad dinámica ($\frac{kg}{m \cdot s}$)

Un valor grande del número de Reynolds indica un régimen turbulento del fluido, mientras que uno pequeño del número de Reynolds indica un régimen laminar. El valor del número de Reynolds para el cual el flujo cambia de laminar a turbulento es el número crítico de Reynolds. Este valor crítico es diferente para las diferentes configuraciones geométricas y solo debe ser utilizado para convección forzada.

- Números de Reynolds para geometrías conocidas:
 - Para una placa plana crítico $Re = 5 \times 10^5$
 - Para tubos: si $Re < 2300$ el flujo es laminar. Si $2300 < Re < 10\,000$ el flujo es de transición. Si $Re > 10\,000$ el flujo es turbulento.

2.5.2.1. Flujo laminar

Es el desplazamiento de un fluido en forma suave y ordenada. El nombre proviene de la palabra laminar que hace referencia al movimiento de las partículas en forma de “láminas”, esto se puede observar fácilmente para fluidos de viscosidad alta como aceites a bajas velocidades.

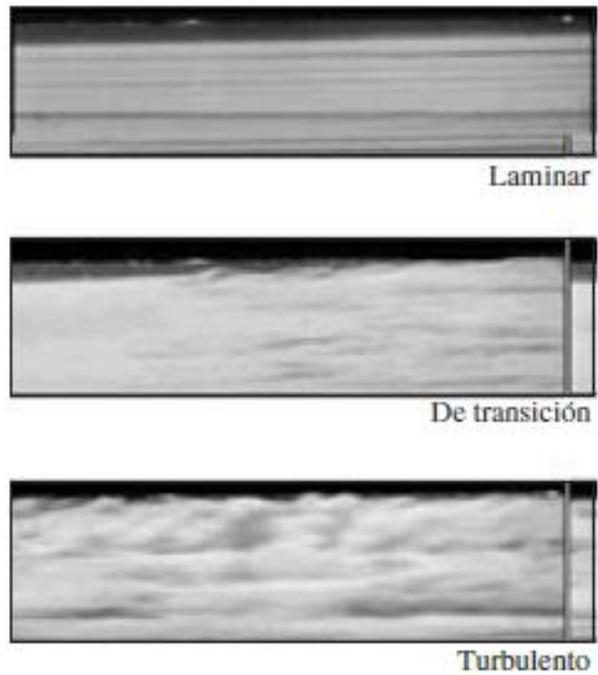
2.5.2.2. Flujo turbulento

Flujo turbulento es aquel que se desplaza de forma desordenada y caótica. El movimiento de las moléculas es aleatorio y es común encontrar formación de remolinos en el fluido a medida que las partículas chocan con las paredes superficiales y entre ellas mismas fluctuando la velocidad de estas a medida que se traslada de un lugar a otro. El nombre proviene de la palabra turbulencia y se puede observar fácilmente en fluidos de baja viscosidad, como el aire, a altas velocidades.

2.5.2.3. Flujo de transición

Es aquel que presenta características tanto de un flujo laminar como de un flujo turbulento, alternando entre ellas.

Figura 7. Flujo laminar, de transición y turbulento



Fuente: CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 379.

La transferencia de calor se ve favorecida para regímenes de flujo turbulento debido al aumento de colisiones entre partículas y las paredes de la superficie del sólido.

2.5.3. Número de Prandtl

Representa el cociente entre la difusividad de momento, su viscosidad y la difusividad térmica del fluido.

$$Pr = \frac{Cp\mu}{k} = \frac{\text{Difusividad molecular del momento}}{\text{Difusividad molecular del calor}}$$

Donde:

Cp = Calor específico del fluido ($\frac{J}{kg \text{ } ^\circ C}$)

μ = Viscosidad dinámica ($\frac{kg}{m \cdot s}$)

k = Conductividad térmica ($\frac{W}{m \text{ } ^\circ C}$)

2.5.4. Número de Nusselt

Mide la relación entre la convección y la conducción, es decir, la transmisión de calor desde una superficie donde un fluido transcurre sobre la capa límite de un sistema, comparado con la transferencia de calor ocurrida por las moléculas posicionadas adyacentemente.

$$Nu = \frac{h Lc}{k} = \frac{\text{Transferencia de calor por convección}}{\text{Transferencia de calor por conducción}}$$

Donde:

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

Lc = Longitud característica (m)

k = Conductividad térmica ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$)

Un valor elevado del número de Nusselt significa que la transferencia de calor por convección es más eficaz, mientras que los valores bajos de este parámetro indican una transferencia por conducción, el valor de $N_u = 1$ significa entonces una transferencia energética provocada únicamente por conducción.

2.5.5. Diámetro hidráulico para tubos no circulares

Tanto el número de Reynolds, como el número de Nusselt para tubos no circulares, el factor de fricción se basa en el diámetro hidráulico D_h definido cómo:

$$D_h = \frac{4A_c}{p}$$

Donde:

D_h = Diámetro hidráulico (m).

A_c = Área de sección transversal del tubo (m^2).

p = Perímetro (m).

2.6. Flujo paralelo sobre placas planas

Considerando un flujo paralelo de un fluido que se desplaza sobre una placa plana de longitud L , según se observa en la figura 6, la coordenada x se encuentra a lo largo de la superficie de la placa, el flujo se desplaza a una velocidad V y temperatura T_∞ .

Se puede observar que la capa límite del flujo inicia como flujo laminar y continúa como turbulento después de una distancia x_{cr} . Para un flujo laminar en una placa plana el valor es de $Re = 1 \times 10^5$ hasta $Re = 3 \times 10^6$. En los análisis de ingeniería podemos aceptar el valor crítico como⁸:

$$Re = \frac{\rho V x_{cr}}{\mu} = 5 \times 10^5$$

2.7. Determinación del coeficiente de transferencia de calor convectivo para un flujo paralelo sobre placas planas

El número de Nusselt promedio sobre una placa plana se determina mediante la sustitución de la solución de la ecuación diferencial de la energía; integrada la ecuación se obtiene la expresión matemática:

Laminar: $N_u = \frac{hL}{k} = 0,664 Re_L^{0.5} Pr^{1/3}$ $Re_L < 5 \times 10^5, Pr > 0.6$

Turbulento: $N_u = \frac{hL}{k} = 0,037 Re_L^{0.8} Pr^{1/3}$ $0,6 \leq Pr \leq 60$
 $5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7$

El primer término caracteriza el flujo sobre toda la placa cuando este es laminar en su totalidad. Igualmente, para un flujo turbulento sobre toda la placa, es válido utilizar la expresión segunda.

Se debe tomar en cuenta las secciones laminar y turbulenta sobre la placa, a excepción de placas donde la longitud es lo suficientemente corta como para que no se produzca un efecto de turbulencia. En este caso, se toma en cuenta el promedio del coeficiente de transferencia de calor de toda la placa a través de la

⁸ CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa* p. 386.

integración de la suma de las últimas dos expresiones matemáticas, resultando en lo siguiente:

$$N_u = \frac{hL}{k} = (0,037Re_L^{0.8} - 871)Pr^{1/3}$$

$$0,6 \leq Pr \leq 60$$

$$5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7$$

Debido a que la adaptación de las ecuaciones matemáticas conlleva a diferentes números críticos de Reynolds para diferentes tipos de fluidos. En 1973, Churchill y Ozoe proponen una ecuación unificada, aplicable para todos los números de Prandtl y con una exactitud de $\pm 1\%$, aplicable a todos los fluidos en geometrías isotérmicas de superficie plana para flujos no turbulentos, incluyendo metales líquidos:

$$N_u = \frac{h_x L}{k} = \frac{0,3387Pr^{1/3}Re_x^{1/2}}{[1 + (0,0468/Pr)^{2/3}]^{1/4}} Re_x Pr \geq 100$$

2.8. Ventiladores

Se conoce como ventilador a las máquinas rotatorias que producen una corriente de aire producto de un diferencial de presiones provocado por el movimiento continuo rotativo de las aspas.

Se pueden observar la aplicación de los ventiladores en una gran variedad de equipos donde se involucra el intercambio de calor o masa. La corriente inducida de aire generalmente produce un flujo turbulento lo cual ayuda a la transferencia energética por la excitación de las partículas, de esta manera se incrementan las colisiones entre estas, forzando la convección de dos sistemas.

Las torres de enfriamiento son de las aplicaciones más utilizadas, donde se induce una corriente de aire en dirección contraria al flujo del fluido que se desea enfriar. El fluido normalmente cae por acción de gravedad y el ventilador se encuentra en la parte superior de la torre, la entrada del flujo de aire entra desde la parte inferior de la torre.

2.8.1. Tipos de ventiladores

Existen diferentes tipos de ventiladores, los principales son:

- Helicoidales
- Axiales
- Centrífugos

Los ventiladores trabajan a diferentes presiones, siendo los centrífugos los de mayor presión, todos estos comparten su función, trasladar una cantidad de aire de un punto a otro.

2.8.2. Velocidad efectiva del aire

La velocidad efectiva es la determinación del caudal que el ventilador es capaz de transportar de un punto a otro.

Esta información es característica de cada ventilador y se encuentra en las curvas de cada uno de estos, así mismo se puede encontrar el área del ducto para obtener la velocidad efectiva de este.

El equipo didáctico para el estudio de la transferencia de calor por convección forzada externa existente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias

de la Universidad de San Carlos de Guatemala, es de forma rectangular por lo que se utiliza un diámetro equivalente para este tipo de ductos.

2.9. Resistencias eléctricas

Se conoce como la oposición que presenta un conductor al paso de la corriente eléctrica provocada por la colisión de electrones con los átomos o moléculas del cuerpo conductor.

Este tipo de fenómeno provoca una transformación energética de eléctrica a térmica, como se explicó en la sección 2.1.4. de este documento, a esta transformación de la energía se le conoce como calor eléctrico.

La aplicación de las resistencias eléctricas se observa en la vida cotidiana, desde el tostador eléctrico, la estufa eléctrica y otros electrodomésticos como algunas secadoras de ropa.

En la industria se utilizan varios equipos como en la industria de envasado y empaclado. Algunos productos como las botellas plásticas son precalentadas por resistencias tubulares.

Para el proyecto se utilizarán resistencias tubulares aletadas instaladas dentro de una placa metálica de superficie lisa y plana.

2.9.1. Tipos de resistencias eléctricas

Existe una gran variedad de resistencias eléctricas en la industria, desde la producción de electrónicos, donde estas tienen tamaños sumamente pequeños, hasta la industria de inyección de plásticos, donde el tamaño varía hasta 30 cm de longitud.

A continuación, se presentan las resistencias más comunes en la industria.

2.9.1.1. Resistencias tubulares aletadas

Hechas con coraza de acero inoxidable, presentan aletas circulares en forma de deflectores planos a lo largo de todo el equipo. Se utilizan para el calentamiento de aire forzado en conductos.

Figura 8. Resistencia tubular aletada



Fuente: PoliMex. Productos de calefacción industrial. *Catálogo de resistencias eléctricas industriales*. p. 3.

2.9.1.2. Resistencias de inmersión

Utilizadas específicamente para el calentamiento de agua u otros líquidos, pueden encontrarse de diferentes materiales como acero inoxidable, teflón o titanio, entre otros.

Figura 9. **Resistencia de inmersión**



Fuente: PoliMex. Productos de calefacción industrial. *Catálogo de resistencias eléctricas industriales*. p. 4.

2.9.1.3. Resistencias tipo abrazaderas

Construidas con coraza de hojalata, bronce o acero inoxidable, se encuentran comúnmente en equipos inyectoros y de moldeo por extrusión e inyección de plástico.

Figura 10. **Resistencia de abrazadera**



Fuente: PoliMex. Productos de calefacción industrial. *Catálogo de resistencias eléctricas industriales.* p. 4.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación, se analizan las variables independientes y dependientes relacionadas al fenómeno de la transferencia de calor.

3.1.1. Variables independientes

- Longitud, ancho y espesor de la placa plana (m).
- Velocidad del flujo de aire (m/s).
- Voltaje inducido en la resistencia eléctrica (V).

3.1.2. Variables dependientes

- Temperatura de entrada al equipo (°C).
- Temperatura de salida del equipo (°C).
- Densidad del flujo de aire (kg/m³).

3.2. Delimitación de campo de estudio

El trabajo está diseñado para ampliar el estudio práctico de la transferencia de calor, por los estudiantes de ingeniería química en la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se diseñó y fabricó un equipo que permite el estudio de los coeficientes de transferencia de calor para tres geometrías de superficies planas y que además no depende de combustibles fósiles para su funcionamiento.

Se determinó su óptimo funcionamiento y se elaboró un manual de uso y mantenimiento preventivo para el mismo, así también el protocolo para la práctica didáctica de laboratorio.

El equipo trabaja con energía eléctrica para el impulso del fluido, en este caso aire, y de la misma manera para el calentamiento de las geometrías de superficie plana que funcionan por medio de una resistencia eléctrica de tipo tubular. Las mediciones se realizaron a través de los gradientes de temperatura que se registran en las termocuplas instaladas en el equipo y la velocidad del fluido fue medida con un anemómetro.

3.2.1. Ubicación

El equipo será ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Br. Oscar Daniel García Aguilar.
- Asesor: Ing. Qco. Jorge Emilio Godínez Lemus.

3.4. Recursos materiales disponibles

- Equipo para el estudio de transferencia de calor por convección forzada externa.
- Lector LCD de temperatura.
- Termómetro laser.
- Anemómetro.

- Cronómetro.

3.5. Técnica cuantitativa y cualitativa

Las técnicas cualitativa y cuantitativa para la ejecución del proyecto son descritas a continuación.

3.5.1. Técnica cualitativa

Se describen los atributos físicos del equipo existente que sirven de base para el diseño y fabricación de las piezas de estudio.

3.5.1.1. Diseño físico de las placas

- Se realizaron las mediciones métricas del equipo, con las cuales se obtuvieron las dimensiones del espacio físico de trabajo, con las que se cuenta para la fabricación de las placas y la base de la resistencia eléctrica.
- Ancho y altura del túnel y, profundidad disponible para las placas planas.

3.5.2. Técnica cuantitativa

Se describe el procedimiento para los cálculos teóricos y prácticos que sirven como base para el diseño de las placas planas para la transferencia de calor.

3.5.2.1. Diseño de la resistencia eléctrica

A continuación, se describen las variables necesarias para el diseño de una resistencia eléctrica con óptima capacidad calorífica para el equipo existente.

3.5.2.1.1. Asumiendo valores de temperatura de salida

- Determinación experimental del valor máximo y mínimo de la velocidad del aire inducido por el ventilador instalado en el equipo por medio del anemómetro.
- Área superficial de las placas: a partir de las dimensiones del equipo se determinó las dimensiones de las placas planas para obtener el área de transferencia de calor.
- Temperatura promedio (T_f) del aire: se asumen valores de temperatura de salida desde 25 °C incrementando 10 °C hasta llegar a 100 °C.
- Propiedades del aire: las temperaturas T_f utilizando la tabla A-15I, apéndice 2 del libro de Cengel, a partir de interpolación lineal.
- Número de Reynolds: para el rango de valores de flujo de aire, desde el mínimo y 25 % de aumento, hasta llegar al valor máximo para el rango de temperaturas propuesto.
- Coeficiente de transferencia de calor: determinación del número de Nusselt y con este el valor teórico del coeficiente de transferencia de calor convectivo.
- Temperatura de superficie de la placa: realizando el balance energético a partir de la ley de Newton de Enfriamiento.
- Potencia de la resistencia (calor transferido): por la ley de Newton de enfriamiento.

3.5.2.1.2. Asumiendo valores de potencia de la resistencia

- Determinación de un valor promedio de potencia: a partir de los datos calculados, al asumir valores de temperatura de salida del aire, se obtiene el valor promedio de potencia de la resistencia eléctrica.
- Calor específico promedio: del rango de temperaturas de operación para despejar la temperatura de salida del aire de la ecuación de balance energético del sistema.
- Coeficiente convectivo: calculado a través de la relación de número adimensionales de Nusselt, Reynolds y Prandtl.
- Temperatura de superficie de la placa plana: despejando la ecuación de la ley de Newton de enfriamiento.

Por medio de tanteo, se obtuvo la potencia ideal que mantiene las condiciones de operación del equipo dentro del rango de seguridad para el usuario (750 W).

3.5.3. Operación del equipo

- Determinación de la velocidad del fluido: por medio del anemómetro disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, se registra la velocidad en metros por segundo de aire desplazado por ventilador, tomando el punto de entrada y salida del equipo.
- Temperatura de superficie: se registrarán por medio del lector LCD de temperatura conectado a las termocuplas instaladas en la entrada y salida del equipo.
- Determinación de los coeficientes de transferencia de calor: por medio de los números adimensionales de Reynolds, Nusselt y Prandtl. Se realiza el

cálculo matemático con las ecuaciones de los números adimensionales, relacionando el régimen del fluido (número de Reynolds) y el número de Prandtl de la tabla de propiedades del aire. De esta manera será posible despejar el valor del coeficiente de transferencia de calor.

- Temperatura de superficie: medido con el termómetro láser apuntado directamente a la superficie de la placa plana en la potencia de operación.
- Comparación del valor de coeficientes de transferencia de calor: a partir del balance energético del sistema, tomando en cuenta las temperaturas involucradas y la velocidad del aire.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

A continuación, se muestran los datos recolectados durante la fase de diseño, fabricación y la fase experimental.

3.6.1. Datos teóricos para el diseño de la resistencia eléctrica

Se determinó la potencia necesaria de una resistencia eléctrica utilizando valores teóricos de la temperatura del aire en la salida del equipo existente.

3.6.1.1. Asumiendo valores de temperatura de salida

A continuación, se describe los valores de temperatura.

Tabla I. **Parámetros dimensionales del túnel y placas planas**

Variable	Magnitud	Unidad de medida
Largo de la placa	0,190	m
Ancho de la placa	0,185	m
Espesor de la placa	0,019	m
Altura del túnel	0,190	m
Ancho del túnel	0,190	m
Área transversal del túnel	0,036	m ²

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Propiedades del aire a la temperatura promedio**

Temperatura (°C)			Densidad	Calor específico	Conductividad térmica	Viscosidad dinámica	Prandtl
T ent	T sal	T (PROM)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kg*°K)	k (J/s*m*K)	μ (kg/m*s)	Pr
25	25,000	25,000	1,184	1 006,506	0,026	1,848E-05	0,729
25,000	30,000	27,500	1,174	1 006,506	0,026	1,859E-05	0,729
25,000	35,000	30,000	1,165	1 006,506	0,026	1,871E-05	0,728
25,000	40,000	32,500	1,155	1 006,527	0,026	1,883E-05	0,727
25,000	45,000	35,000	1,146	1 006,715	0,026	1,894E-05	0,727
25,000	50,000	37,500	1,136	1 006,903	0,026	1,905E-05	0,726
25,000	55,000	40,000	1,127	1 006,924	0,027	1,917E-05	0,725
25,000	60,000	42,500	1,118	1 006,924	0,027	1,929E-05	0,725
25,000	65,000	45,000	1,110	1 006,924	0,027	1,940E-05	0,724
25,000	70,000	47,500	1,101	1 006,924	0,027	1,952E-05	0,723
25,000	75,000	50,000	1,092	1 006,924	0,027	1,963E-05	0,722
25,000	80,000	52,500	1,084	1 006,924	0,028	1,973E-05	0,721
25,000	100,000	62,500	1,052	1 007,343	0,028	2,018E-05	0,719

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Número de Reynolds para las diferentes temperaturas de salida y a las velocidades de trabajo**

Velocidad (m/s)	0,200	0,375	0,550	0,725	0,900
	Velocidad mínima	25 %	50 %	75 %	Velocidad mínima
Tf (°C)	Re	Re	Re	Re	Re
25,000	2 370,443	4 444,581	6 518,718	8 592,856	10 666,994
27,500	2 336,001	4 380,002	6 424,002	8 468,003	10 512,004
30,000	2 302,007	4 316,263	6 330,519	8 344,775	10 359,030
32,500	2 268,690	4 253,793	6 238,897	8 224,001	10 209,104
35,000	2 237,697	4 195,682	6 153,667	8 111,652	10 069,637
37,500	2 207,053	4 138,224	6 069,395	8 000,567	9 931,738
40,000	2 175,894	4 079,802	5 983,709	7 887,617	9 791,524
42,500	2 145,016	4 021,906	5 898,795	7 775,684	9 652,573
45,000	2 115,466	3 966,499	5 817,532	7 668,565	9 519,599
47,500	2 086,734	3 912,626	5 738,519	7 564,411	9 390,303
50,000	2 058,888	3 860,416	5 661,943	7 463,471	9 264,998
52,500	2 032,039	3 810,073	5 588,107	7 366,141	9 144,175
62,500	1 928,304	3 615,569	5 302,835	6 990,101	8 677,366

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Coeficiente convectivo, temperatura de superficie de la placa y potencia de la resistencia para una velocidad de aire de 0,200 m/s**

T PROM (°C)	Re	Pr	Nu	Ts (°C)	Q (J/s)	h (J/s*°K*m²)
25,000	2 370,443	0,729	29,102	25,000	0,000	4,013
27,500	2 336,001	0,729	28,880	177,563	43,020	4,011
30,000	2 302,007	0,728	28,661	330,245	86,041	4,010
32,500	2 268,690	0,727	28,444	483,061	129,064	4,008
35,000	2 237,697	0,727	28,240	635,889	172,118	4,008
37,500	2 207,053	0,726	28,035	788,910	215,187	4,007
40,000	2 175,894	0,725	27,828	942,274	258,230	4,005
42,500	2 145,016	0,725	27,622	1 095,934	301,269	4,002
45,000	2 115,466	0,724	27,423	1 249,381	344,307	4,000
47,500	2 086,734	0,723	27,223	1 403,008	387,345	3,998
50,000	2 058,888	0,722	27,033	1 556,515	430,384	3,997
52,500	2 032,039	0,721	26,843	1 710,600	473,422	3,995
62,500	1 928,304	0,719	26,122	2 326,565	645,844	3,992

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Coefficiente convectivo, temperatura de superficie de la placa y potencia de la resistencia para una velocidad de aire de 0,375 m/s**

T PROM (°C)	Re	Pr	Nu	Ts (°C)	Q (J/s)	h (J/s*°K*m²)
25,000	4 444,581	0,729	39,849	25,000	0,000	5,494
27,500	4 380,002	0,729	39,546	233,905	80,663	5,493
30,000	4 316,263	0,728	39,245	442,974	161,327	5,490
32,500	4 253,793	0,727	38,948	652,226	241,995	5,488
35,000	4 195,682	0,727	38,669	861,494	322,721	5,488
37,500	4 138,224	0,726	38,388	1 071,026	403,476	5,487
40,000	4 079,802	0,725	38,105	1 281,029	484,182	5,483
42,500	4 021,906	0,725	37,823	1 491,437	564,879	5,479
45,000	3 966,499	0,724	37,550	1 701,552	645,575	5,477
47,500	3 912,626	0,723	37,276	1 911,915	726,272	5,475
50,000	3 860,416	0,722	37,017	2 122,113	806,969	5,474
52,500	3 810,073	0,721	36,756	2 333,102	887,666	5,471
62,500	3 615,569	0,719	35,769	3 176,548	1 210,957	5,466

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Coeficiente convectivo, temperatura de superficie de la placa y potencia de la resistencia para una velocidad de aire de 0,550 m/s**

T PROM (°C)	Re	Pr	Nu	Ts (°C)	Q (J/s)	h (J/s*°K*m²)
25,000	6 518,718	0,729	48,260	25,000	0,000	6,654
27,500	6 424,002	0,729	47,893	277,997	118,306	6,652
30,000	6 330,519	0,728	47,528	531,192	236,613	6,649
32,500	6 238,897	0,727	47,168	784,609	354,926	6,646
35,000	6 153,667	0,727	46,831	1 038,044	473,324	6,646
37,500	6 069,395	0,726	46,490	1 291,801	591,765	6,645
40,000	5 983,709	0,725	46,147	1 546,127	710,133	6,641
42,500	5 898,795	0,725	45,806	1 800,944	828,488	6,636
45,000	5 817,532	0,724	45,476	2 055,405	946,844	6,633
47,500	5 738,519	0,723	45,144	2 310,168	1 065,199	6,631
50,000	5 661,943	0,722	44,830	2 564,730	1 183,555	6,629
52,500	5 588,107	0,721	44,513	2 820,251	1 301,910	6,625
62,500	5 302,835	0,719	43,319	3 841,714	1 776,071	6,619

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Coefficiente convectivo, temperatura de superficie de la placa y potencia de la resistencia para una velocidad de aire de 0,725 m/s**

T PROM (°C)	Re	Pr	Nu	Ts (°C)	Q (J/s)	h (J/s*°K*m²)
25,000	8 592,856	0,729	55,408	25,000	0,000	7,640
27,500	8 468,003	0,729	54,987	315,471	155,949	7,637
30,000	8 344,775	0,728	54,568	606,169	311,898	7,634
32,500	8 224,001	0,727	54,155	897,123	467,857	7,631
35,000	8 111,652	0,727	53,767	1188,097	623,927	7,631
37,500	8 000,567	0,726	53,376	1479,441	780,054	7,629
40,000	7 887,617	0,725	52,983	1771,438	936,084	7,624
42,500	7 775,684	0,725	52,590	2063,999	1 092,098	7,619
45,000	7 668,565	0,724	52,212	2356,151	1 248,113	7,616
47,500	7 564,411	0,723	51,831	2648,649	1 404,127	7,613
50,000	7 463,471	0,722	51,470	2940,917	1 560,141	7,611
52,500	7 366,141	0,721	51,107	3234,286	1 716,155	7,607
62,500	6 990,101	0,719	49,735	4407,050	2 341,184	7,600

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Coeficiente convectivo, temperatura de superficie de la placa y potencia de la resistencia para una velocidad de aire de 0,900 m/s**

T PROM (°C)	Re	Pr	Nu	Ts (°C)	Q (J/s)	h (J/s*°K*m ²)
25,000	10 666,994	0,729	61,734	25,000	0,000	8,512
27,500	10 512,004	0,729	61,264	348,635	193,592	8,509
30,000	10 359,030	0,728	60,798	672,522	387,184	8,506
32,500	10 209,104	0,727	60,338	996,695	580,788	8,502
35,000	10 069,637	0,727	59,906	1 320,890	774,529	8,502
37,500	9 931,738	0,726	59,470	1 645,497	968,343	8,500
40,000	9 791,524	0,725	59,032	1 970,832	1 162,036	8,495
42,500	9 652,573	0,725	58,595	2 296,795	1 355,708	8,489
45,000	9 519,599	0,724	58,173	2 622,303	1 549,381	8,486
47,500	9 390,303	0,723	57,748	2 948,196	1 743,054	8,482
50,000	9 264,998	0,722	57,346	3 273,834	1 936,726	8,480
52,500	9 144,175	0,721	56,942	3 600,697	2 130,399	8,475
62,500	8 677,366	0,719	55,414	4 907,357	2 906,297	8,467

Fuente: elaboración propia.

3.6.1.2. Asumiendo valor de 750 W de potencia de la resistencia eléctrica

Se asume un valor de 750 W para la potencia de la resistencia y se calcula teóricamente la temperatura en la superficie de la placa y la temperatura de salida del aire.

Tabla IX. **Coefficiente convectivo y temperatura de superficie de la placa para una velocidad de aire de 0,200 m/s**

Propiedades a velocidad MÍNIMA	Valor	Unidad de medida
Velocidad del aire	0,2000	m/s
Flujo másico del aire	0,0085	kg/s
Calor específico promedio del aire (T [25,100] °C)	1 006,8110	J/kg*°K
Potencia de la resistencia	750,0000	J/s
Temperatura de salida del aire	112,1414	°C
Temperatura promedio	68,5707	°C
Calor específico a "T PROM"	999,0961	J/kg*°K
Conductividad térmica	0,0291	J/s*m*K
Viscosidad dinámica	2,0770E-05	kg/m*s
Densidad	0,96240	kg/m ³
Número de Prandtl	0,70884	
Número de Reynolds	1 714,4005	
Número de Nusselt	24,5136	
Coefficiente convectivo	3,8562	J/s*°K*m ²
Temperatura de superficie de la placa	2 791,5715	°C

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Coeficiente convectivo y temperatura de superficie de la placa para una velocidad de aire de 0,375 m/s**

Propiedades a velocidad 25 %	Valor	Unidad de medida
Velocidad del aire	0,3750	m/s
Flujo másico del aire	0,0160	kg/s
Calor específico promedio del aire (T [25,100] °C)	1 006,8110	J/kg*°K
Potencia de la resistencia	750,0000	J/s
Temperatura de salida del aire	71,4754	°C
Temperatura promedio	48,2377	°C
Calor específico a "T PROM"	1 004,5208	J/kg*°K
Conductividad térmica	0,0273	J/s*m*K
Viscosidad dinámica	1,9634E-05	kg/m*s
Densidad	1,07319	kg/m ³
Número de Prandtl	0,72100	
Número de Reynolds	3 791,9485	
Número de Nusselt	36,6645	
Coeficiente convectivo	5,4111	J/s*°K*m ²
Temperatura de superficie de la placa	1 996,5985	°C

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Coeficiente convectivo y temperatura de superficie de la placa para una velocidad de aire de 0,550 m/s**

Propiedades a velocidad 50 %	Valor	Unidad de medida
Velocidad del aire	0,5500	m/s
Flujo másico del aire	0,0235	kg/s
Calor específico promedio del aire (T [25,100] °C)	1 006,8110	J/kg*°K
Potencia de la resistencia	750,0000	J/s
Temperatura de salida del aire	56,6878	°C
Temperatura promedio	40,8439	°C
Calor específico a "T PROM"	1 008,1804	J/kg*°K
Conductividad térmica	0,0267	J/s*m*K
Viscosidad dinámica	1,9269E-05	kg/m*s
Densidad	1,10665	kg/m ³
Número de Prandtl	0,72374	
Número de Reynolds	5 843,5904	
Número de Nusselt	45,5724	
Coeficiente convectivo	6,5815	J/s*°K*m ²
Temperatura de superficie de la placa	1 646,0047	°C

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Coeficiente convectivo y temperatura de superficie de la placa para una velocidad de aire de 0,725 m/s**

Propiedades a velocidad 75 %	Valor	Unidad de medida
Velocidad del aire	0,7250	m/s
Flujo másico del aire	0,0310	kg/s
Calor específico promedio del aire (T [25,100] °C)	1 006,8110	J/kg*°K
Potencia de la resistencia	750,0000	J/s
Temperatura de salida del aire	49,0390	°C
Temperatura promedio	37,0195	°C
Calor específico a "T PROM"	1 004,7738	J/kg*°K
Conductividad térmica	0,0264	J/s*m*K
Viscosidad dinámica	1,9105E-05	kg/m*s
Densidad	1,12577	kg/m ³
Número de Prandtl	0,72538	
Número de Reynolds	7 903,2174	
Número de Nusselt	53,0385	
Coeficiente convectivo	7,5811	J/s*°K*m ²
Temperatura de superficie de la placa	1 432,2522	°C

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Coeficiente convectivo y temperatura de superficie de la placa para una velocidad de aire de 0,900 m/s**

Propiedades a velocidad MÁXIMA	Valor	Unidad de medida
Velocidad del aire	0,9000	m/s
Flujo másico del aire	0,0385	kg/s
Calor específico promedio del aire (T [25,100] °C)	1 006,8110	J/kg*°K
Potencia de la resistencia	750,0000	J/s
Temperatura de salida del aire	44,3648	°C
Temperatura promedio	34,6824	°C
Calor específico a "T PROM"	1 007,3430	J/kg*°K
Conductividad térmica	0,0283	J/s*m*K
Viscosidad dinámica	2,0183E-05	kg/m*s
Densidad	1,05184	kg/m ³
Número de Prandtl	0,71906	
Número de Reynolds	8 677,3664	
Número de Nusselt	55,4137	
Coeficiente convectivo	8,4675	J/s*°K*m ²
Temperatura de superficie de la placa	1 284,9426	°C

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación, se muestra el historial de toma de datos experimentales y el análisis gráfico del fenómeno de la transferencia de calor en las placas planas construidas.

3.7.1. Caracterización experimental de instrumentos y equipo

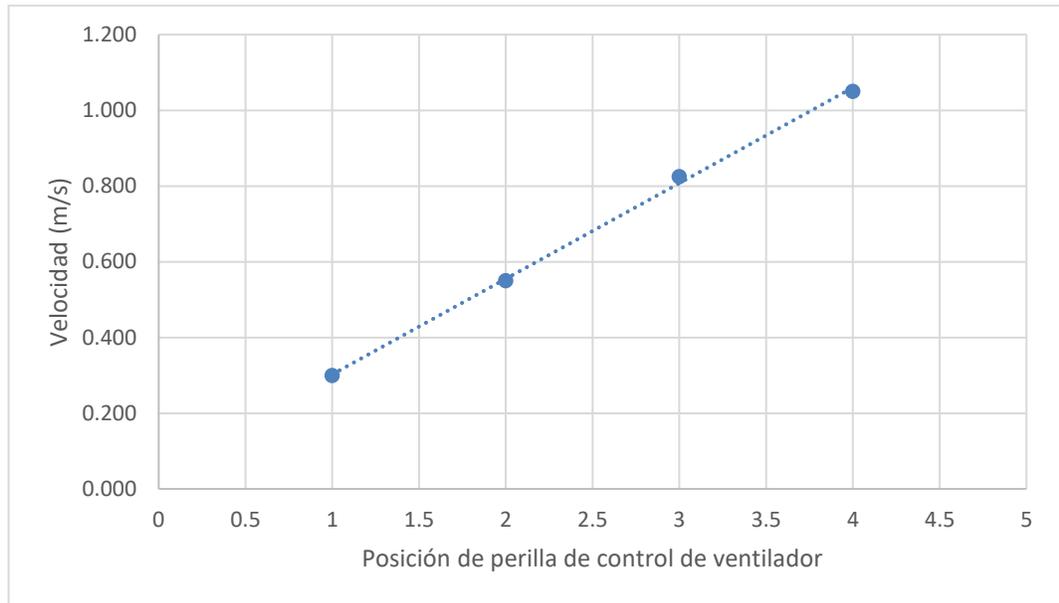
Se describe gráficamente el comportamiento de los equipos utilizados según las diferentes variables de manejo.

Tabla XIV. Caracterización de anemómetro

Posición de perilla de control de ventilador	Tiempo (min)	Velocidad (m/s)	V PROM (m/s)
1	0:00	0,3	0,300
	1:48	0,3	
	3:47	0,3	
	5:23	0,3	
2	0:00	0,5	0,550
	2:19	0,5	
	4:20	0,6	
	5:11	0,6	
3	0:00	0,8	0,825
	1:42	0,8	
	3:18	0,8	
	5:12	0,9	
FULL	0:00	1,1	1,050
	2:09	1,0	
	4:16	1,1	
	5:25	1,0	

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Caracterización gráfica de anemómetro**



Color	Caracterización	Modelo matemático	Correlación (R ²)
	Velocidad	$y = 0,2525x + 0,05$	0,9986

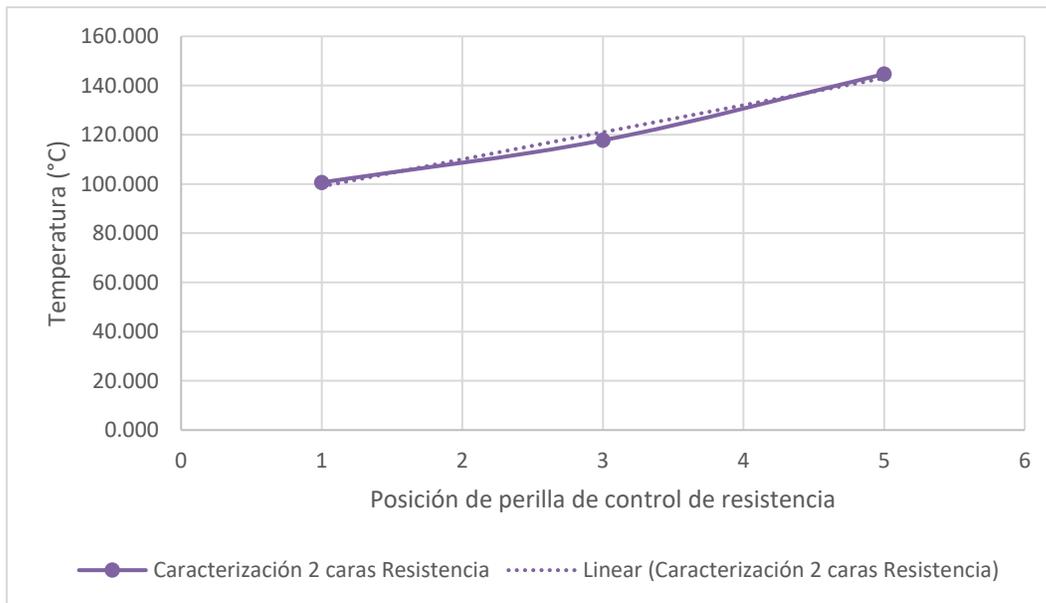
Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Temperatura de superficie de placa plana de dos caras de calentamiento**

Perilla de resistencia	Temperatura de superficie (°C)
1	100,667
3	117,780
5	144,683

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Temperatura de superficie de placa plana de dos caras de calentamiento**



Color	Caracterización	Modelo matemático	Correlación (R ²)
	Temperatura de superficie	$y = 11,004x + 73,031$	0,983

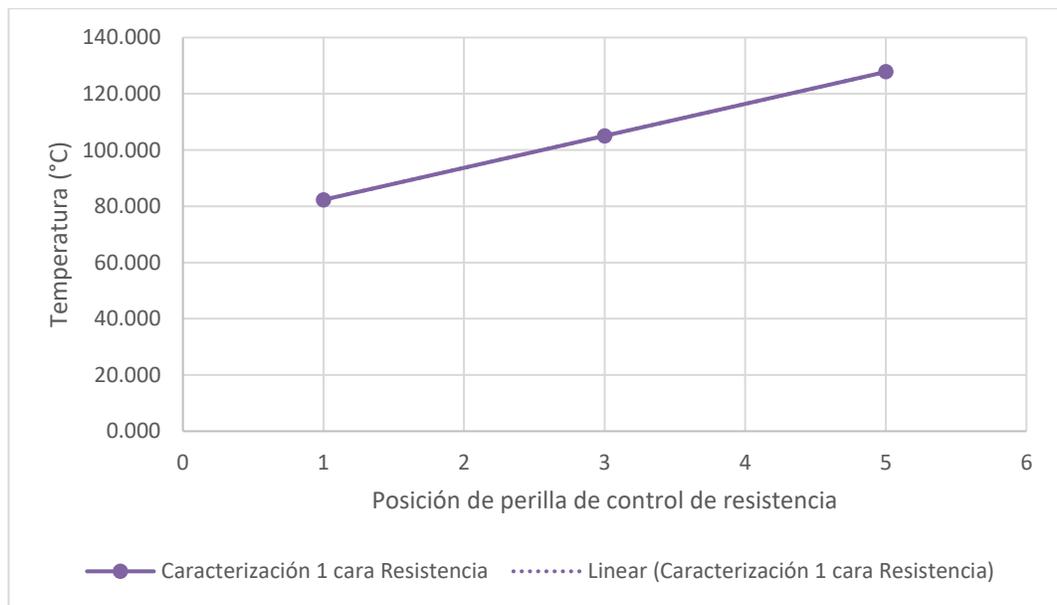
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Temperatura de superficie de placa plana de una cara de calentamiento**

Perilla de resistencia	Temperatura de superficie (°C)
1	82,293
3	105,038
5	127,786

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Temperatura de superficie de placa plana de una cara de calentamiento**



Color	Caracterización	Modelo matemático	Correlación (R ²)
	Temperatura de superficie	$y = 11,373x + 55,919$	0,999

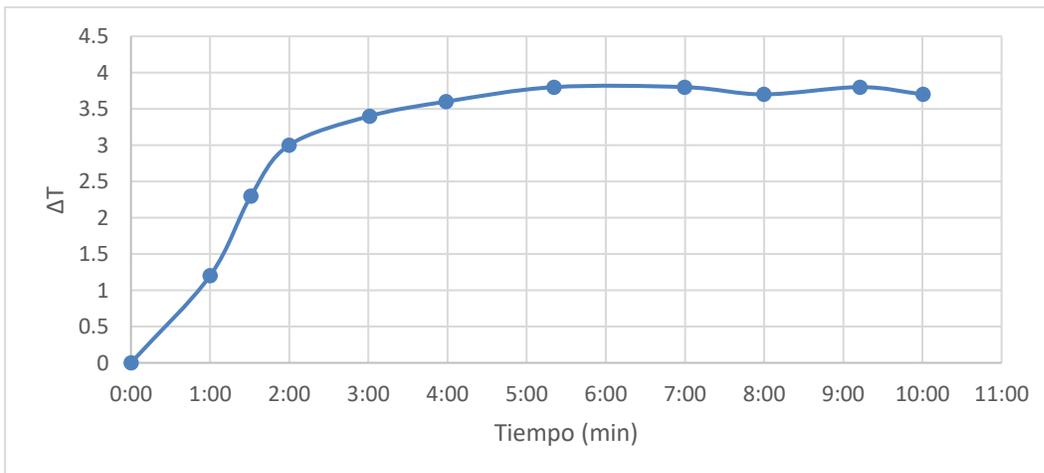
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 0,303 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	ΔT
0:00	31,5	31,5	0,0
1:00	31,5	32,7	1,2
1:31	31,7	34,0	2,3
2:00	31,8	34,8	3,0
3:01	31,8	35,2	3,4
3:59	32,1	35,7	3,6
5:21	31,9	35,7	3,8
7:00	31,9	35,7	3,8
8:00	31,9	35,6	3,7
9:13	31,8	35,6	3,8
10:01	31,9	35,6	3,7

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 0,303 m/s**



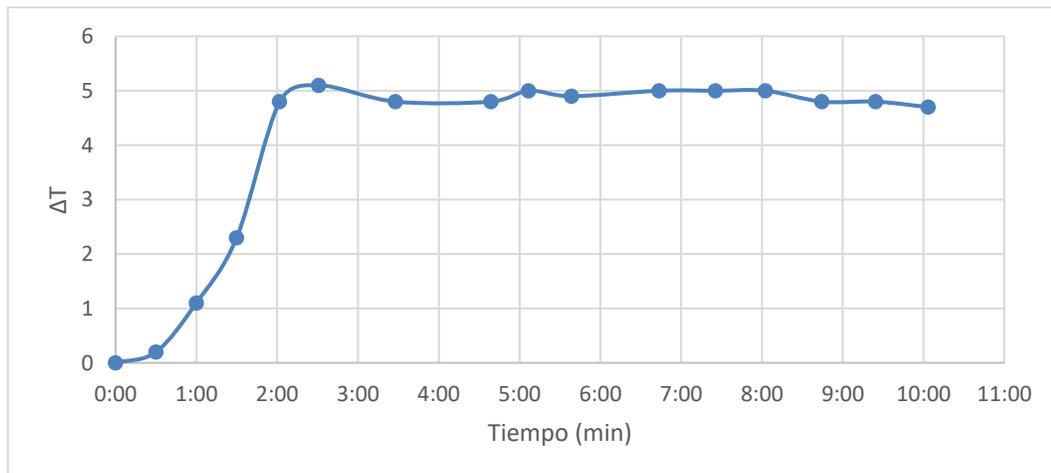
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 0,555 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	ΔT
0:00	29,6	29,6	0,0
1:00	30,1	31,2	1,1
2:31	28,7	33,8	5,1
3:28	29,7	34,5	4,8
5:07	30,1	35,1	5,0
5:39	30,2	35,1	4,9
6:44	30,0	35,0	5,0
7:26	30,0	35,0	5,0
8:03	29,8	34,8	5,0
9:25	29,7	34,5	4,8
10:04	29,8	34,5	4,7

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 0,555 m/s**



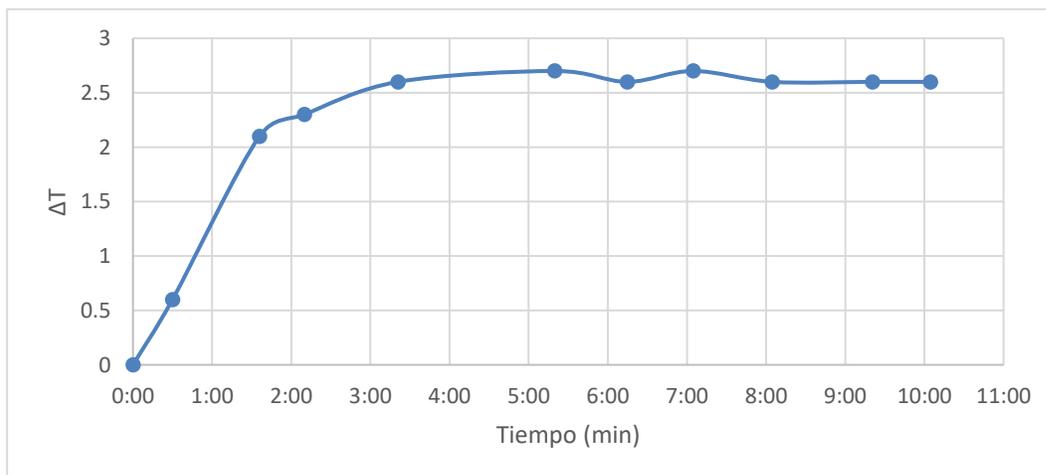
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 0,808 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	ΔT
0:00	31,2	31,2	0,0
0:30	31,2	31,8	0,6
1:36	31,1	33,2	2,1
2:10	31,2	33,5	2,3
3:21	31,2	33,8	2,6
5:20	31,2	33,9	2,7
6:15	31,2	33,8	2,6
7:05	31,3	34,0	2,7
8:05	31,3	33,9	2,6
9:21	31,4	34,0	2,6
10:05	31,4	34,0	2,6

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 0,808 m/s**



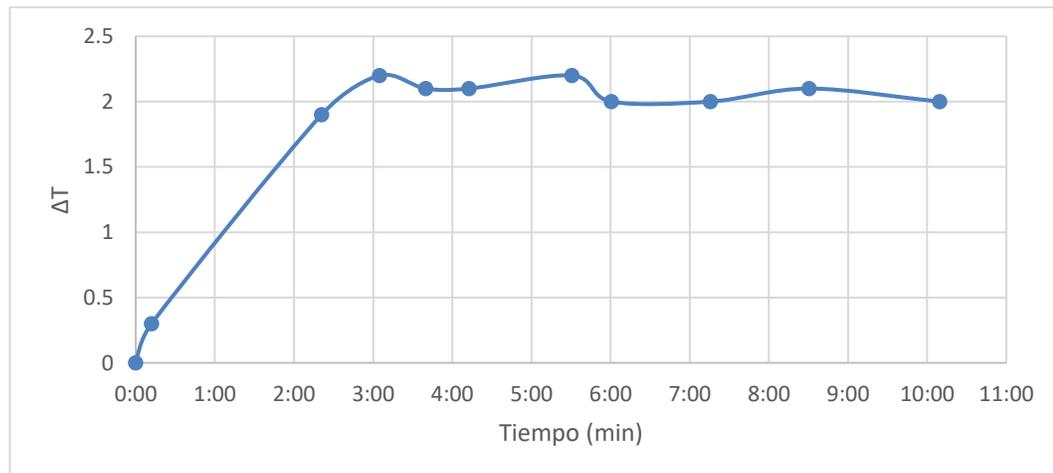
Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 1,060 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	ΔT
0:00	30,7	30,7	0,0
0:12	30,7	31,0	0,3
2:21	30,8	32,7	1,9
3:05	30,6	32,8	2,2
3:40	30,7	32,8	2,1
4:13	30,7	32,8	2,1
5:31	30,5	32,7	2,2
6:01	30,8	32,8	2,0
7:16	31,0	33,0	2,0
8:31	31,2	33,3	2,1
10:10	31,2	33,2	2,0

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Estabilización de la resistencia en posición “4” de perilla de control y velocidad de aire de 1,060 m/s**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Valores de operación a velocidad de 0,303 m/s**

Variable de manejo	Magnitud
Posición de perilla de control de resistencia	4,000
Temperatura de superficie (°C)	132,047
Posición de perilla de control de ventilador	1,000
Flujo másico (kg/s)	0,013

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Valores de operación a velocidad de 0,555 m/s**

Variable de manejo	Magnitud
Posición de perilla de control de resistencia	4,000
Temperatura de superficie (°C)	132,047
Posición de perilla de control de ventilador	2,000
Flujo másico (kg/s)	0,023

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Valores de operación a velocidad de 0,808 m/s**

Variable de manejo	Magnitud
Posición de perilla de control de resistencia	4,000
Temperatura de superficie (°C)	132,047
Posición de perilla de control de ventilador	3,000
Flujo másico (kg/s)	0,034

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Valores de operación a velocidad de 1,060 m/s**

Variable de manejo	Magnitud
Posición de perilla de control de resistencia	4,000
Temperatura de superficie (°C)	132,047
Posición de perilla de control de ventilador	4,000
Flujo másico (kg/s)	0,044

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Coeficientes de transferencia de calor de placa plana de dos caras de calentamiento a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,303 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	Calor por radiación (W)	Calor TOTAL (W)	Coeficiente convectivo (J/s*°K*m^2)
2:29	32,8	37,6	6,059E-02	60,937	8,725
2:59	32,9	37,6	6,059E-02	59,667	8,552
3:36	32,6	37,6	6,059E-02	63,476	9,071
4:03	32,9	37,6	6,059E-02	59,667	8,552
5:05	32,8	37,5	6,059E-02	59,667	8,543
6:02	32,6	37,4	6,059E-02	60,937	8,708
7:00	32,6	37,4	6,059E-02	60,937	8,708
8:05	32,6	37,6	6,059E-02	63,476	9,071
9:10	32,7	37,6	6,059E-02	62,206	8,898
9:59	32,6	37,6	6,059E-02	63,476	9,071

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Coefficientes de transferencia de calor de placa plana de dos caras de calentamiento a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,555 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	Calor por radiación (W)	Calor TOTAL (W)	Coefficiente convectivo (J/s*°K*m ²)
1:22	31,200	35,000	6,059E-02	88,509	12,476
2:01	32,000	35,300	6,059E-02	76,863	10,920
3:00	32,200	35,300	6,059E-02	72,205	10,278
4:08	32,200	35,300	6,059E-02	72,205	10,278
5:01	32,200	35,200	6,059E-02	69,876	9,946
6:00	32,100	35,200	6,059E-02	72,205	10,268
7:00	32,100	35,100	6,059E-02	69,876	9,936
8:00	31,900	35,200	6,059E-02	76,863	10,909
9:02	31,900	35,200	6,059E-02	76,863	10,909
10:00	31,800	35,200	6,059E-02	79,193	11,229

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Coeficientes de transferencia de calor de placa plana de dos caras de calentamiento a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,808 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	Calor por radiación (W)	Calor TOTAL (W)	Coeficiente convectivo (J/s*°K*m^2)
1:12	31,200	33,700	6,059E-02	84,722	11,942
2:37	31,400	33,800	6,059E-02	81,333	11,486
3:06	31,500	33,800	6,059E-02	77,944	11,018
4:10	31,200	33,900	6,059E-02	91,500	12,898
5:28	31,400	33,900	6,059E-02	84,722	11,965
6:02	31,500	34,000	6,059E-02	84,722	11,977
7:01	31,600	33,900	6,059E-02	77,944	11,029
8:04	31,600	34,000	6,059E-02	81,333	11,509
9:09	31,500	33,900	6,059E-02	81,333	11,498
10:32	31,400	33,700	6,059E-02	77,944	11,008

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Coeficientes de transferencia de calor de placa plana de dos caras de calentamiento a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 1,060 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	Calor por radiación (W)	Calor TOTAL (W)	Coeficiente convectivo (J/s*°K*m^2)
06:01	31,100	33,600	6,059E-02	111,214	15,663
07:15	31,300	33,600	6,059E-02	102,317	14,438
08:03	31,200	33,500	6,059E-02	102,317	14,424
09:00	31,400	33,400	6,059E-02	88,971	12,566
10:24	31,200	33,300	6,059E-02	93,420	13,169
11:00	31,400	33,400	6,059E-02	88,971	12,566
12:00	31,500	33,400	6,059E-02	84,523	11,949
13:03	31,500	33,300	6,059E-02	80,074	11,320
14:07	31,300	33,200	6,059E-02	84,523	11,925
15:01	31,500	33,200	6,059E-02	75,625	10,690

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Coefficientes de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición superior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,303 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	Calor por radiación (W)	Calor TOTAL (W)	Coefficiente convectivo (J/s*°K*m^2)
0:05	26,900	31,900	3,660E-02	63,476	20,163
1:50	26,600	31,800	3,660E-02	66,015	20,900
3:25	26,600	31,900	3,660E-02	67,284	21,302
4:07	26,700	32,100	3,660E-02	68,554	21,728
5:00	26,500	32,200	3,660E-02	72,362	22,885
6:06	26,200	32,000	3,660E-02	73,632	23,210
7:00	26,400	32,100	3,660E-02	72,362	22,860
8:11	26,600	32,400	3,660E-02	73,632	23,313
9:18	26,400	32,300	3,660E-02	74,902	23,662
10:01	26,600	32,300	3,660E-02	72,362	22,911

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Coefficientes de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición superior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,555 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	Calor por radiación (W)	Calor TOTAL (W)	Coefficiente convectivo (J/s*°K*m ²)
0:03	25,900	28,700	3,660E-02	65,218	20,488
0:54	26,100	28,580	3,660E-02	57,764	18,185
2:38	25,900	28,600	3,660E-02	62,888	19,756
3:51	26,200	28,900	3,660E-02	62,888	19,821
5:33	26,200	29,000	3,660E-02	65,218	20,556
6:01	26,200	29,000	3,660E-02	65,218	20,556
7:04	26,000	29,000	3,660E-02	69,876	21,976
8:00	26,100	29,000	3,660E-02	67,547	21,267
9:16	26,200	29,100	3,660E-02	67,547	21,290
10:04	26,300	29,100	3,660E-02	65,218	20,579

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Coefficientes de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición superior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,808 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	Calor por radiación (W)	Calor TOTAL (W)	Coefficiente convectivo (J/s*°K*m^2)
0:04	25,800	27,700	3,660E-02	64,389	20,205
2:08	25,400	27,300	3,660E-02	64,389	20,116
3:05	25,500	27,400	3,660E-02	64,389	20,138
4:01	25,600	27,500	3,660E-02	64,389	20,160
5:02	25,400	27,300	3,660E-02	64,389	20,116
6:00	25,500	27,400	3,660E-02	64,389	20,138
7:01	25,600	27,500	3,660E-02	64,389	20,160
8:00	25,500	27,500	3,660E-02	67,778	21,199
9:01	25,500	27,600	3,660E-02	71,166	22,259
10:26	25,800	27,700	3,660E-02	64,389	20,205

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Coeficientes de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición superior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 1,060 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	Calor por radiación (W)	Calor TOTAL (W)	Coeficiente convectivo (J/s*°K*m^2)
0:06	26,100	27,900	3,660E-02	80,074	25,213
2:06	26,000	27,700	3,660E-02	75,625	23,785
3:10	26,000	27,800	3,660E-02	80,074	25,185
4:52	25,600	27,400	3,660E-02	80,074	25,074
5:17	25,600	27,300	3,660E-02	75,625	23,681
6:03	26,000	27,600	3,660E-02	71,177	22,386
7:00	26,200	27,900	3,660E-02	75,625	23,838
8:21	25,600	27,300	3,660E-02	75,625	23,681
9:20	25,700	27,300	3,660E-02	71,177	22,312
10:00	25,900	27,500	3,660E-02	71,177	22,361

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Coefficientes de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición inferior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,303 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura a ENT (°C)	Temperatura a SAL (°C)	Calor por radiación (W)	Calor TOTAL (W)	Coefficiente convectivo (J/s*°K*m²)
0:06	25,300	28,400	3,660E-02	39,355	12,277
1:30	25,200	28,800	3,660E-02	45,703	14,244
3:10	25,100	28,800	3,660E-02	46,972	14,624
4:02	25,100	28,900	3,660E-02	48,242	15,019
5:04	25,200	29,000	3,660E-02	48,242	15,036
6:16	25,500	29,300	3,660E-02	48,242	15,085
7:09	25,600	29,300	3,660E-02	46,972	14,704
8:47	24,900	29,000	3,660E-02	52,050	16,170
9:13	24,800	28,900	3,660E-02	52,050	16,153
10:00	25,100	28,900	3,660E-02	48,242	15,019

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Coeficientes de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición inferior a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,555 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	Calor por radiación (W)	Calor TOTAL (W)	Coeficiente convectivo (J/s*°K*m ²)
0:09	24,700	26,500	3,660E-02	41,926	12,994
1:21	24,900	26,600	3,660E-02	39,596	12,299
2:56	24,700	26,600	3,660E-02	44,255	13,717
4:14	24,500	26,500	3,660E-02	46,584	14,408
5:22	24,500	26,500	3,660E-02	46,584	14,408
6:31	24,600	26,300	3,660E-02	39,596	12,258
7:06	24,600	26,400	3,660E-02	41,926	12,980
8:00	24,400	26,400	3,660E-02	46,584	14,392
9:01	24,400	26,300	3,660E-02	44,255	13,672
10:18	24,300	26,300	3,660E-02	46,584	14,377

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Coefficientes de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición inferior, a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 0,808 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	Calor por radiación (W)	Calor TOTAL (W)	Coefficiente convectivo (J/s*°K*m^2)
0:21	24,500	25,900	3,660E-02	47,444	14,674
1:26	24,500	25,900	3,660E-02	47,444	14,674
2:50	24,600	25,900	3,660E-02	44,055	13,640
4:20	24,300	25,600	3,660E-02	44,055	13,596
6:00	24,300	25,600	3,660E-02	44,055	13,596
6:32	24,300	25,600	3,660E-02	44,055	13,596
7:25	24,400	25,700	3,660E-02	44,055	13,610
8:09	24,400	25,700	3,660E-02	44,055	13,610
9:24	24,400	25,600	3,660E-02	40,667	12,563
10:30	24,300	25,600	3,660E-02	44,055	13,596

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Coeficientes de transferencia de calor de placa plana de una cara de calentamiento en posición inferior, a partir de los datos calculados por temperaturas registradas a velocidad de aire de 1,060 m/s**

Tiempo (min)	Temperatura ENT (°C)	Temperatura SAL (°C)	Calor por radiación (W)	Calor TOTAL (W)	Coeficiente convectivo (J/s*°K*m ²)
0:03	24,500	25,900	3,660E-02	62,280	19,266
1:13	24,700	25,900	3,660E-02	53,383	16,548
2:09	24,500	25,800	3,660E-02	57,831	17,889
3:40	24,300	25,600	3,660E-02	57,831	17,851
5:01	24,400	25,500	3,660E-02	48,934	15,119
6:14	24,200	25,400	3,660E-02	53,383	16,459
7:11	24,200	25,400	3,660E-02	53,383	16,459
8:16	24,300	25,500	3,660E-02	53,383	16,477
9:07	24,400	25,600	3,660E-02	53,383	16,494
10:05	24,400	25,600	3,660E-02	53,383	16,494

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

A continuación, se presentan el análisis estadístico de los resultados obtenidos durante la fase experimental.

Tabla XXXVII. Promedio y desviación estándar para la placa plana de dos caras de calentamiento

Velocidad (m/s)	Velocidad (m/s)	Promedio	Desviación Estándar(σ)
Temperatura de entrada (°C)	0,303	32,710	0,122
Temperatura de salida (°C)		37,550	0,081
Calor por radiación (W)		0,061	0,000
Calor TOTAL (W)		61,445	1,523
Coefficiente convectivo (J/s*°K*m ²)		8,790	0,210
Calor por convección (W)		30,692	0,762
Temperatura de entrada (°C)	0,555	32,100	0,287
Temperatura de salida (°C)		35,200	0,089
Calor por radiación (W)		0,061	0,000
Calor TOTAL (W)		75,466	5,332
Coefficiente convectivo (J/s*°K*m ²)		10,715	0,725
Calor por convección (W)		37,703	2,666
Temperatura de entrada (°C)	0,808	31,430	0,135
Temperatura de salida (°C)		33,860	0,102
Calor por radiación (W)		0,061	0,000
Calor TOTAL (W)		82,350	4,024
Coefficiente convectivo (J/s*°K*m ²)		11,633	0,558
Calor por convección (W)		41,145	2,012
Temperatura de entrada (°C)	1,060	31,340	0,136
Temperatura de salida (°C)		33,390	0,137
Calor por radiación (W)		0,061	0,000
Calor TOTAL (W)		91,195	10,574
Coefficiente convectivo (J/s*°K*m ²)		12,871	1,478
Calor por convección (W)		45,567	5,287

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. Promedio y desviación estándar para la placa plana de una cara de calentamiento en posición superior

Velocidad (m/s)	Velocidad (m/s)	Promedio	Desviación Estándar (σ)
Temperatura de entrada ($^{\circ}\text{C}$)	0,303	26,550	0,180
Temperatura de salida ($^{\circ}\text{C}$)		32,100	0,190
Calor por radiación (W)		0,037	0,000
Calor TOTAL (W)		70,458	3,646
Coefficiente convectivo ($\text{J/s}^{\circ}\text{K}^{\text{m}^2}$)		22,293	1,122
Calor por convección (W)		70,422	3,646
Temperatura de entrada ($^{\circ}\text{C}$)	0,555	26,110	0,130
Temperatura de salida ($^{\circ}\text{C}$)		28,898	0,188
Calor por radiación (W)		0,037	0,000
Calor TOTAL (W)		64,938	3,133
Coefficiente convectivo ($\text{J/s}^{\circ}\text{K}^{\text{m}^2}$)		20,447	0,987
Calor por convección (W)		64,901	3,133
Temperatura de entrada ($^{\circ}\text{C}$)	0,808	25,560	0,136
Temperatura de salida ($^{\circ}\text{C}$)		27,490	0,137
Calor por radiación (W)		0,037	0,000
Calor TOTAL (W)		65,405	2,170
Coefficiente convectivo ($\text{J/s}^{\circ}\text{K}^{\text{m}^2}$)		20,470	0,673
Calor por convección (W)		65,369	2,170
Temperatura de entrada ($^{\circ}\text{C}$)	1,060	25,870	0,215
Temperatura de salida ($^{\circ}\text{C}$)		27,570	0,233
Calor por radiación (W)		0,037	0,000
Calor TOTAL (W)		75,625	3,446
Coefficiente convectivo ($\text{J/s}^{\circ}\text{K}^{\text{m}^2}$)		23,752	1,088
Calor por convección (W)		75,589	3,446

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. Promedio y desviación estándar para la placa plana de una cara de calentamiento en posición inferior

Velocidad (m/s)	Velocidad (m/s)	Promedio	Desviación Estándar (σ)
Temperatura de entrada (°C)	0,303	25,180	0,232
Temperatura de salida (°C)		28,930	0,245
Calor por radiación (W)		0,009	0,000
Calor TOTAL (W)		47,607	3,371
Coefficiente convectivo (J/s*°K*m ²)		23,707	1,630
Calor por convección (W)		47,598	3,371
Temperatura de entrada (°C)	0,555	24,560	0,169
Temperatura de salida (°C)		26,440	0,111
Calor por radiación (W)		0,015	0,000
Calor TOTAL (W)		43,789	2,716
Coefficiente convectivo (J/s*°K*m ²)		18,019	1,086
Calor por convección (W)		43,774	2,716
Temperatura de entrada (°C)	0,808	24,400	0,100
Temperatura de salida (°C)		25,710	0,130
Calor por radiación (W)		0,024	0,000
Calor TOTAL (W)		44,394	1,825
Coefficiente convectivo (J/s*°K*m ²)		15,654	0,652
Calor por convección (W)		44,370	1,825
Temperatura de entrada (°C)	1,060	24,390	0,145
Temperatura de salida (°C)		25,620	0,178
Calor por radiación (W)		0,037	0,000
Calor TOTAL (W)		54,717	3,474
Coefficiente convectivo (J/s*°K*m ²)		16,906	1,081
Calor por convección (W)		54,681	3,474

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

4.1. Diseño de equipo

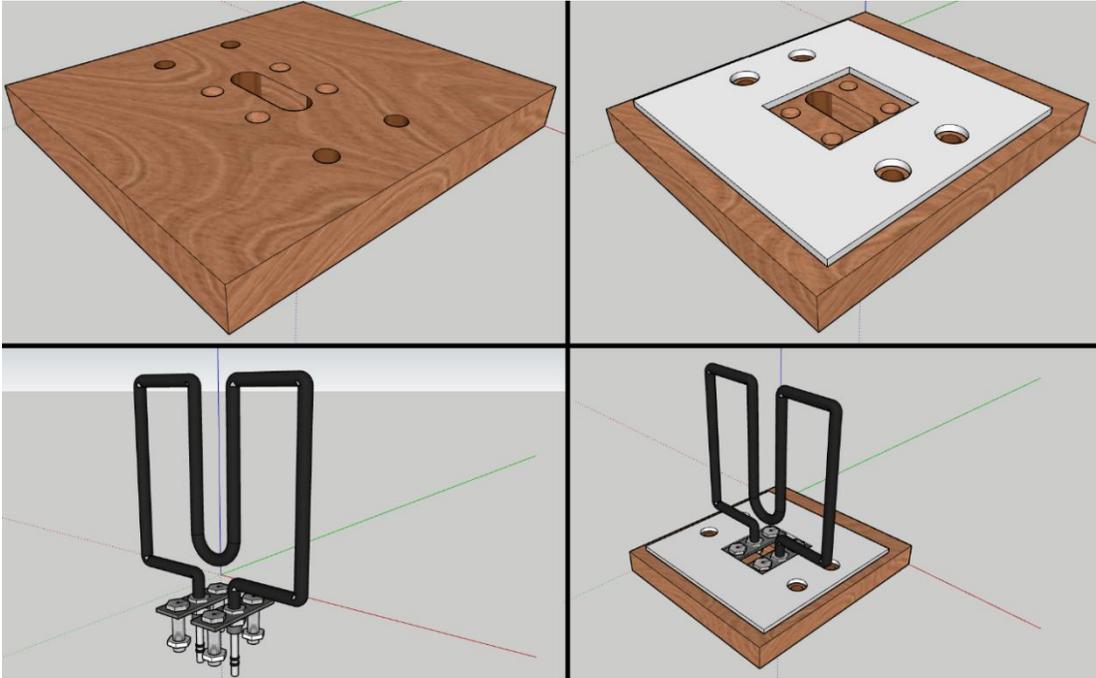
Se describe la fase de diseño para las placas planas de estudio desde el modelado tridimensional de las piezas hasta la construcción.

4.1.1. Plataforma con resistencia eléctrica tipo tubular

Se diseñó el tamaño de la plataforma y de la resistencia a partir de las dimensiones del espacio físico disponible del túnel con el programa de diseño tridimensional SketchUp 2018.

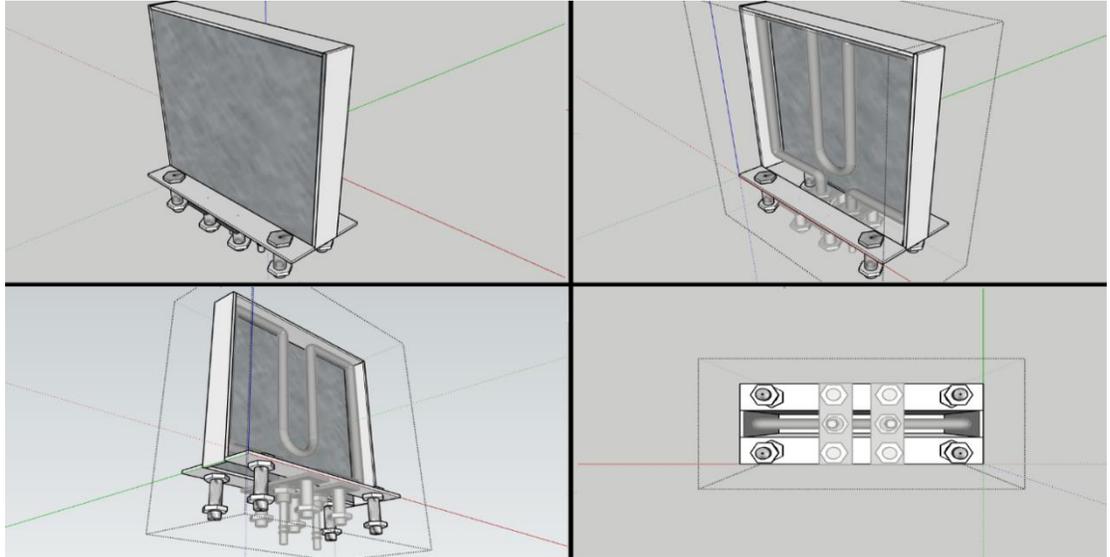
De esta manera se obtuvo las piezas necesarias para la construcción del equipo con las medidas exactas necesarias, el diseño y los planos fueron utilizados con los proveedores locales como guía para la elección de los materiales de construcción y para la fabricación de la resistencia.

Figura 18. **Plataforma, aislante térmico y resistencia eléctrica**



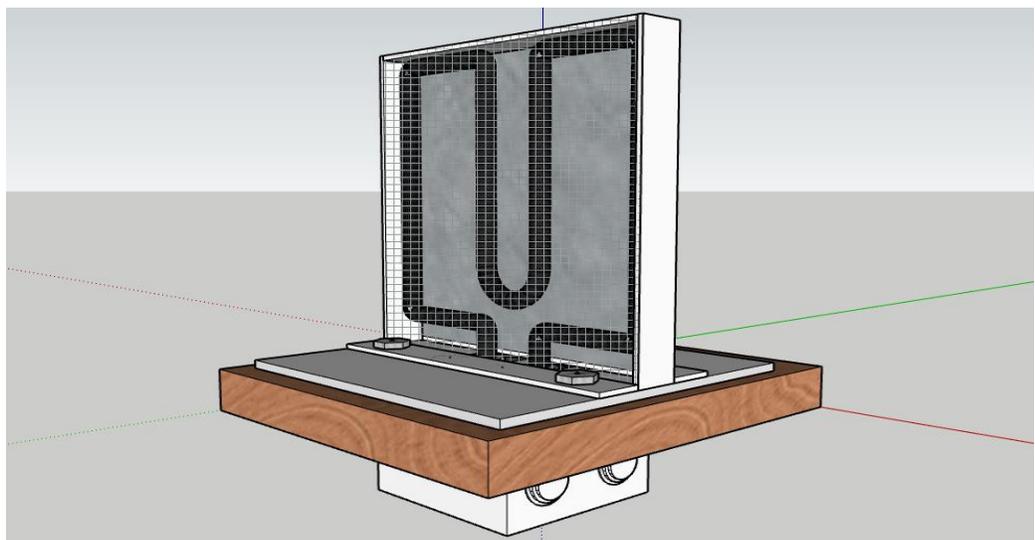
Fuente: elaboración propia, empleando Sketchup 2018.

Figura 19. **Placas planas adaptables a la plataforma**



Fuente: elaboración propia, empleando Sketchup 2018.

Figura 20. **Diseño preliminar de plataforma, resistencia y placa plana adaptable a la plataforma**



Fuente: elaboración propia, empleando Sketchup 2018.

4.1.2. Potencia de la resistencia

A partir de los datos tabulados en las tablas IX, X, XI y XII se fabricó la resistencia de potencia 1 500 W para corriente alterna de 110 V con el proveedor INGELMEC, Obteniendo dos veces la potencia sugerida como factor de seguridad para evitar corto circuito, fallas eléctricas y daños irreversibles de esta.

Figura 21. Plataforma y resistencia



Fuente: elaboración propia, fotografía La Antigua Guatemala, mayo 2019.

4.1.3. Construcción de las placas planas

Las placas planas están fabricadas de lámina de Aluzinc de 28 mm de espesor, conformadas de una sola pieza. La lámina es cortada con tijera hasta la

forma inicial (lado izquierdo figura 22) y forjada manualmente hasta su forma final (lado derecho figura 22).

Los bordes de las placas son recubiertos con material aislante epoxi color rojo para altas temperaturas y así evitar la transferencia de calor en esta sección.

Figura 22. **Construcción de placa plana de dos caras de calentamiento**



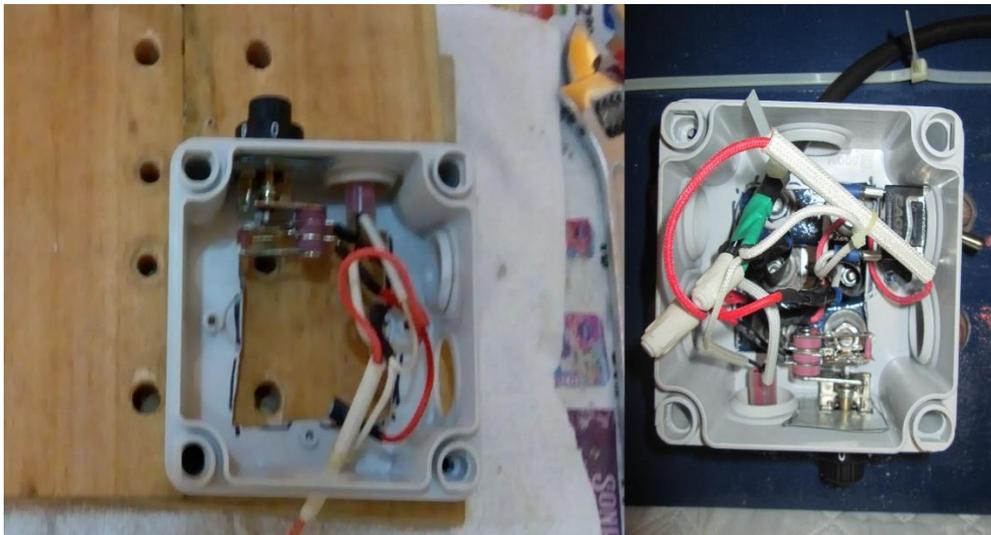
Fuente: elaboración propia, fotografía La Antigua Guatemala, agosto 2019.

El equipo terminado puede observarse en la figura 3.

4.1.4. Circuito eléctrico

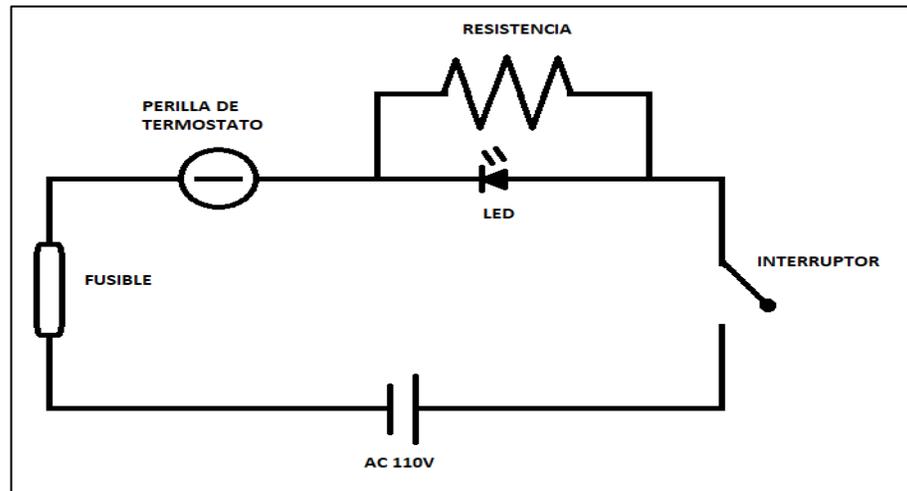
Se muestra el circuito eléctrico de la resistencia de calentamiento para la transferencia de calor.

Figura 23. Construcción de circuito eléctrico



Fuente: elaboración propia, fotografía La Antigua Guatemala, agosto 2019.

Figura 24. Diagrama eléctrico de circuito



Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Costo de construcción de equipo**

Descripción	Costo (Q)
Tabla para construcción de plataforma	Q 30,00
Manijas y cerrojos	Q 75,00
Resistencia eléctrica	Q 1 100,00
Accesorios varios para construcción de equipo (tornillos, sellador, brocas, lija, tuercas, roldanas, laca azul, brochas, tijera para cortar lámina, etc.)	Q 350,00
Fibrocemento lámina plana 06 mm INT 4'x8'	Q 185,58
Lámina lisa HG C/28 mm 3*8	Q 62,54
Varios (comida parqueo, gasolina)	Q 1 500,00
Cableado y componentes eléctricos para el circuito	Q 350,00
Mano de obra	Q 7 500,00
TOTAL	Q 11 153,12

Fuente: elaboración propia.

4.2. Coeficiente convectivo del equipo

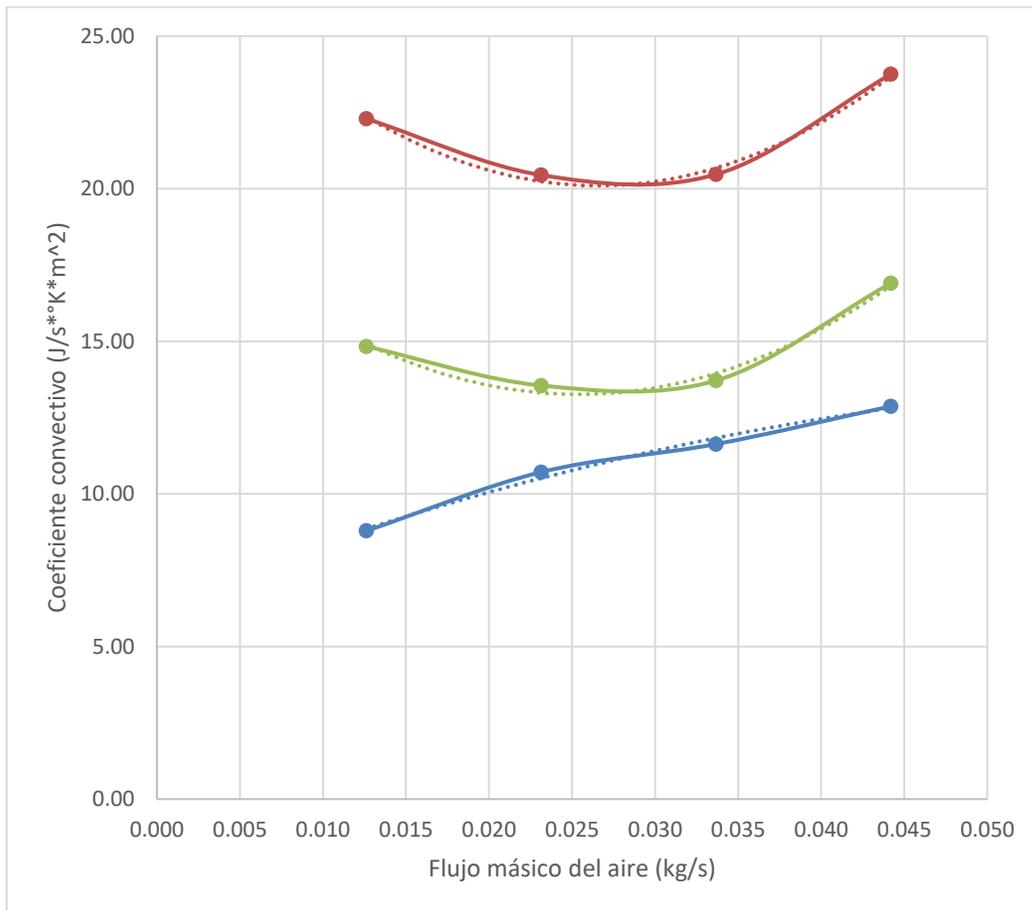
A continuación, se muestra el comportamiento gráfico del coeficiente convectivo según diferentes flujos máxicos de aire analizados en la fase experimental.

Tabla XLI. **Temperatura de salida y coeficientes convectivos de transferencia de calor para placas planas de dos caras de calentamiento (2CC), una cara de calentamiento posición superior (1CCS) y una cara de calentamiento posición inferior (1CCI), según flujo máxico del aire**

Placa plana	2CC		1CCS		1CCI	
Flujo máxico (kg/s)	Temperatura SAL (°C)	Coeficiente convectivo (J/s*°K*m ²)	Temperatura SAL (°C)	Coeficiente convectivo (J/s*°K*m ²)	Temperatura SAL (°C)	Coeficiente convectivo (J/s*°K*m ²)
0,01	37,55	8,79	32,10	22,29	28,93	14,83
0,02	35,20	10,71	28,90	20,45	26,44	13,55
0,03	33,86	11,63	27,49	20,47	25,71	13,72
0,04	33,39	12,87	27,57	23,75	25,62	16,91

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Coeficientes convectivos de transferencia de calor para placas planas de dos caras de calentamiento (2CC), una cara de calentamiento posición superior (1CCS) y una cara de calentamiento posición inferior (1CCI) según flujo másico del aire**



Color	Caracterización	Modelo matemático	Correlación (R ²)
	2CC	$y = -1\,550,100x^2 + 213,070x + 6,415$	0,990
	1CCS	$y = 11\,566,000x^2 - 615,290x + 28,284$	0,987
	1CCI	$y = 10\,088,000x^2 - 512,470x + 19,771$	0,982

Fuente: elaboración propia.

4.3. Instructivo de realización de la práctica

El siguiente instructivo describe los detalles para la realización de una práctica didáctica que tiene como objetivo el estudio de la transferencia de calor a través de placas planas.

4.3.1. Equipo para el estudio de transferencia de calor por convección forzada externa para geometrías planas

A continuación, se describen los instrumentos y equipos para la realización de la práctica.

4.3.1.1. Túnel

El equipo consiste en un túnel cuadrado con un ventilador instalado en uno de los extremos para la inducción de aire a través de este. En la sección media del túnel se encuentra el espacio donde se adaptan las diferentes geometrías planas para el estudio de transferencia de calor (figura 1).

4.3.1.1. Placas planas

Se cuenta con una resistencia tubular instalada en una plataforma de madera (figura 3) a la que se adaptan dos configuraciones geoméricamente planas por medio de tornillos. Se fabricaron dos geometrías planas, una con dos caras de calentamiento y otra con un aislante en una de las caras que puede instalarse con la cara de calentamiento posicionada en la parte superior o inferior.

4.3.1.2. Objetivo general

Evaluar el comportamiento de los coeficientes individuales de transferencia de calor por convección forzada externa para las tres geometrías planas disponibles.

4.3.1.3. Objetivos específicos

- Calcular el perfil de temperaturas para la geometría de dos caras de calentamiento y una cara de calentamiento.
- Determinar la eficiencia de la transferencia de calor de cada geometría plana.
- Evaluar el coeficiente convectivo de transferencia de calor para cada geometría, a partir de los parámetros adimensionales y sus correlaciones.
- Comparar el coeficiente de transferencia de calor experimental, con el valor teórico, para cada una de las diferentes geometrías.
- Determinar el coeficiente total de transferencia de calor para cada arreglo proporcionado en el laboratorio.

4.4. Manual de usuario

Este manual describe el manejo adecuado del equipo didáctico de transferencia de calor por convección forzada externa para geometrías de placas planas.

Previo a utilizar el equipo es indispensable leer y comprender las instrucciones descritas en este manual.

4.4.1. Operación

- Ubicar los equipos y asegurarse que ninguno esté conectado a la corriente eléctrica.
- Identificar la plataforma para placas planas de resistencia tubular y las placas planas adaptables para esta misma (placa de una cara de calentamiento y de dos caras de calentamiento).
- Instalar la placa plana de dos caras de calentamiento por medio de los tornillos incorporados en la plataforma. Asegurarla con roldanas y tuercas provistas por el laboratorio, de manera que quede alineada y firme.
- Verificar que el interruptor de la plataforma se encuentre en modo *Off* y que la perilla de control de temperatura se encuentre en posición "0".
- Insertar el arreglo en el espacio de instalación del túnel y asegurar los cerrojos de la plataforma con el túnel.
- Conectar el ventilador al controlador de velocidades. Verificar que la perilla de control se encuentre velocidad mínima y el interruptor en posición de apagado. Conectar el controlador de velocidades a la corriente eléctrica.
- Conectar los 3 sensores ubicados en la parte trasera del equipo, al lector de temperaturas LCD. Tomar en cuenta las polaridades (+/-) para

insertarlos en la parte superior del lector de temperatura en el orden establecido.

- Conectar la plataforma de la placa plana a la corriente eléctrica (110 V).
- Accionar el anemómetro e introducir cuidadosamente el sensor en el agujero de medición de salida. Verificar que el sensor esté descubierto y que se haya establecido el valor cero.
- Accionar el ventilador girando la perilla del controlador de velocidades hasta detectar flujo de aire. Regresar la perilla hasta alcanzar la marca inicial en la sección negra y generar la curva de caracterización de velocidades en m/s utilizando el anemómetro. Retirar el sensor del anemómetro después de generar la curva (rango de lectura precisa 0,2 – 25 m/s).
- Posicionar la perilla de control de ventilador a su máxima potencia para comenzar a generar el perfil de temperaturas.
- Accionar el interruptor de la placa plana en encendido *On* y posicionar la perilla de control en posición “4” dejar estabilizar el sistema por cinco minutos. ADVERTENCIA: nunca posicionar la perilla de control de temperatura en su valor máximo para evitar corto circuito del sistema eléctrico o fallos irreparables a la resistencia eléctrica.
- Encender el lector de temperaturas, oprimiendo el interruptor de encendido y asegurarse que el gradiente de temperatura sea estable.
- Registrar las temperaturas obtenidas con el lector LCD durante un tiempo no menor de cinco minutos.
- Apagar el lector de temperaturas.
- Reducir la velocidad del ventilador girando la perilla del controlador hasta la siguiente marca. Esperar 2 minutos para que el sistema se estabilice y repetir pasos XII al XV, hasta llegar a la mínima velocidad registrada en la caracterización del anemómetro.

- Apagar la placa plana con el interruptor de encendido/apagado y esperar 5 minutos a que se enfríe por el aire inducido. Asegurarse de mantener el ventilador accionado a su mínima capacidad durante este tiempo.
- Apagar el controlador de velocidades girando la perilla hasta la posición cero.
- Verificar que la placa esté a temperatura ambiente por medio del lector LCD.
- Retirar la placa plana utilizando guantes térmicos y una llave fija (*wrench*) de 1/2".
- Instalar la placa plana de una cara de calentamiento y repetir pasos de VII al XX.
- Al terminar al paso XX, instalar la misma placa plana de una cara de calentamiento, rotándola 180° (posicionar la cara de calentamiento en sentido contrario al previamente instalado) y repetir pasos de VII al XX.
- Desconectar cada uno de los sensores de temperatura del lector LCD.
- Desenchufar la fuente de electricidad del controlador de velocidades.
- Dejar limpia y ordenada el área de trabajo.

4.4.2. Medidas de seguridad y precauciones

La manipulación del equipo debe realizarse siguiendo los lineamientos básicos de seguridad para la protección del equipo, del estudiante y de las personas presentes en el laboratorio.

La mala manipulación del equipo puede resultar en quemaduras de tercer y cuarto grado debido a las altas temperaturas que la resistencia eléctrica es capaz de alcanzar.

- Verificar que el equipo esté desconectado de la corriente eléctrica cada vez que se desea manipularlo o ubicarlo en otra región del laboratorio.

- Evitar el contacto directo con las placas y la resistencia tubular cuando esté conectada a la corriente eléctrica y el interruptor se encuentre en posición de encendido.
- Utilizar guantes térmicos al manipular la plataforma y placas planas después de haber sido utilizadas.
- Utilizar corriente eléctrica de 110 V únicamente.
- No conectar la plataforma de resistencia tubular sin que esté instalada en el túnel.
- No obstruir la salida del flujo de aire cuando el equipo esté en funcionamiento.
- Evitar derrame de líquidos en el equipo y sus alrededores.
- No ingresar las manos dentro del túnel cuando esté en funcionamiento.
- Manejar el cableado eléctrico de los sensores y equipos de forma ordenada y señalizada para evitar tropiezos, daños y descalibrar los equipos.
- Si ocurre un accidente, comuníquelo de inmediato a su instructor o auxiliar encargado.

4.5. Programa de mantenimiento

El mantenimiento preventivo del equipo protege su integridad. Garantiza su funcionamiento y rendimiento óptimo, aumentando el tiempo de vida. Es indispensable seguir el procedimiento de mantenimiento para garantizar el desempeño de los elementos eléctricos.

Tabla XLII. Frecuencia de mantenimiento preventivo del equipo

MANTENIMIENTO PREVENTIVO	FRECUENCIA	INSTRUCCIONES
Limpieza del interior del túnel.	Cada 15 días después de su último uso	Correr el compartimiento izquierdo de madera hasta el tope derecho para acceder al interior del túnel.
Limpieza del ventilador	Cada 15 días después de su último uso	Limpiar gentilmente con un paño húmedo las aspas y el cuerpo del ventilador, así como las paredes del túnel.
Limpieza de las placas planas	Previo a su uso	Limpiar con un paño húmedo las placas planas, retirando el polvo acumulado por dentro y por fuera de estas.
Limpieza de la resistencia eléctrica	Previo a su uso	Limpiar con extrema precaución, con un paño húmedo la plataforma y la resistencia tubular. Verificar que no quede humedad sobre la resistencia eléctrica.
Verificación del circuito eléctrico	Cada 15 días después de su último uso	Verificar el estado del cableado, fusible, interruptor y perilla de control de temperaturas.

Fuente: elaboración propia.

4.5.1. Solución de problemas

En caso de fallas de funcionamiento rutinarias, tomar en cuenta lo siguiente:

- La resistencia no emite calor:
 - Revisar que la plataforma esté conectada a una corriente eléctrica de 110 V y que el interruptor se encuentre en posición de encendido.
 - Destapar la caja y revisar que el cableado, uniones, fusible y componentes eléctricos se encuentren en óptimas condiciones. Al encontrar uno o más componentes dañados, reemplazarlos por nuevos.

Si el problema persiste, es probable que la resistencia esté averiada y sea necesario su reemplazo.

- Lector de temperaturas LCD no enciende.
 - Reemplazar la batería.

Si el problema persiste, es probable que el equipo esté dañado y sea necesario su reemplazo.

- Lecturas de temperatura incoherentes.
 - Calibrar el equipo siguiendo el procedimiento descrito en el manual del usuario del lector de temperaturas LCD.
 - Verificar individualmente cada sensor con el lector de temperaturas LCD. Al encontrar uno o más sensores dañados, reemplazarlos.

Si el inconveniente persiste, es probable que el equipo esté deteriorado y sea necesario su reemplazo.

- Ventilador no acciona
 - Verificar que el ventilador esté conectado correctamente en el controlador de velocidades.
 - Verificar que el controlador de velocidades esté conectado a una corriente eléctrica de 110 V y que esté encendido.
 - Girar la perilla de control en diferentes posiciones.
 - Conectar el ventilador directamente a una corriente eléctrica de 110 V. Si el ventilador se acciona, el problema se encuentra en el controlador de velocidades.

Si el contratiempo continúa, es probable que el equipo esté dañado y sea necesario su reemplazo.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El equipo para el estudio de la transferencia de calor por convección forzada externa se diseñó específicamente para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El diseño a tres dimensiones del equipo elaborado por computadora facilitó la ejecución del trabajo de graduación, ya que proyectó la menor cantidad de piezas necesarias para un funcionamiento óptimo capaz de adaptarse adecuadamente al espacio físico disponible.

A pesar de contar con una resistencia de 1 500 W de potencia y que durante la operación se utilizan 800 W. En la tabla XLI se observan los valores de temperatura de salida del aire y coeficiente de transferencia de calor relativamente bajos [25,62 – 37,55] °C y [8,79 – 32,10] J/s*°K*m² respectivamente. Esto se debe a que el calor generado por la resistencia eléctrica se transfiere por convección natural dentro de las placas planas y por conducción en las paredes hacia el exterior de esta. Este fenómeno está descrito en el apartado “4.2.1. Conducción” del Marco Teórico de este documento.

El valor de mayor magnitud para el coeficiente de transferencia de calor se encontró con la placa plana de una cara de calentamiento posicionada en la parte superior (tabla XLI, $h = 32,10 \text{ J/s}^{\circ}\text{K}\cdot\text{m}^2$). Esto puede deberse a que el peso del aislante térmico (fibrocemento) desequilibra la placa, provocando contacto directo entre la resistencia eléctrica y la pared de calentamiento y, por tanto, una

transferencia de calor por conducción directa resistencia-pared en un punto específico de la placa.

La transferencia de calor se ve favorecida con la reducción de flujo de aire inducido en el túnel. Este fenómeno es causa de la baja conductividad térmica del aire, por lo que una reducción del flujo másico provoca un mayor tiempo de contacto con la placa plana y como resultado se puede observar un gradiente mayor en la temperatura de salida.

CONCLUSIONES

1. La placa plana de dos caras de calentamiento opera establemente, con lo que es posible caracterizar el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por convección forzada externa en el rango de 8,79 a 12,87 $W \cdot K \cdot m^2$.
2. La placa plana de una cara de calentamiento opera establemente, con lo que es posible caracterizar el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por convección forzada externa en el rango de 14,83 a 23,75 $W \cdot K \cdot m^2$.
3. La resistencia eléctrica tiene capacidad de potencia de 1 500 W y está diseñada específicamente para el equipo didáctico para el estudio de coeficientes de transferencia de calor por convección forzada externa para operar a 800 W de potencia.
4. El equipo se adapta satisfactoriamente en el túnel y con un gradiente mínimo de temperatura de 1,23 °C y un máximo de 5,55 °C, teniendo una relación inversamente proporcional al flujo de aire inducido.
5. El instructivo de realización de práctica indica los pasos específicos a seguir para los estudiantes que realizarán las futuras prácticas experimentales en el laboratorio.

6. El manual de usuario especifica los rangos de operación de las variables de manejo para el óptimo funcionamiento del equipo y los parámetros de seguridad a seguir para las prácticas experimentales en el laboratorio.

7. El programa de mantenimiento señala los puntos críticos de control que deben de ser tomados en cuenta para que el equipo mantenga sus condiciones de operación óptimas.

RECOMENDACIONES

1. Manejar las placas planas cuidadosamente para no dañar las paredes o el sello hermético de estas.
2. Revisar la integridad del sello aislante de las placas planas y de la plataforma de la resistencia para evitar transferencia de calor en las paredes del espesor de las placas y asegurarse que no exista flujo de aire dentro de las placas.
3. Revisar que la temperatura de superficie de la cara aislada de la placa plana de una cara de calentamiento se encuentre a temperatura ambiente, antes de iniciar las mediciones para evitar perfiles de temperatura imprecisos.
4. Utilizar el equipo acorde a los manuales e instructivos descritos en este documento para garantizar el óptimo funcionamiento del equipo.
5. Revisar que los datos del anemómetro sean estables y coherentes. Tomar en cuenta que, al no contar con baterías cargadas, los datos se pueden alterar significativamente.
6. Para que el equipo conserve su calidad es necesario seguir el programa de mantenimiento preventivo descrito en este documento antes de cualquier práctica.

7. Iniciar las mediciones del perfil de temperaturas a partir de la potencia máxima del ventilador hasta la potencia mínima para evitar el desgaste del equipo.

BIBLIOGRAFÍA

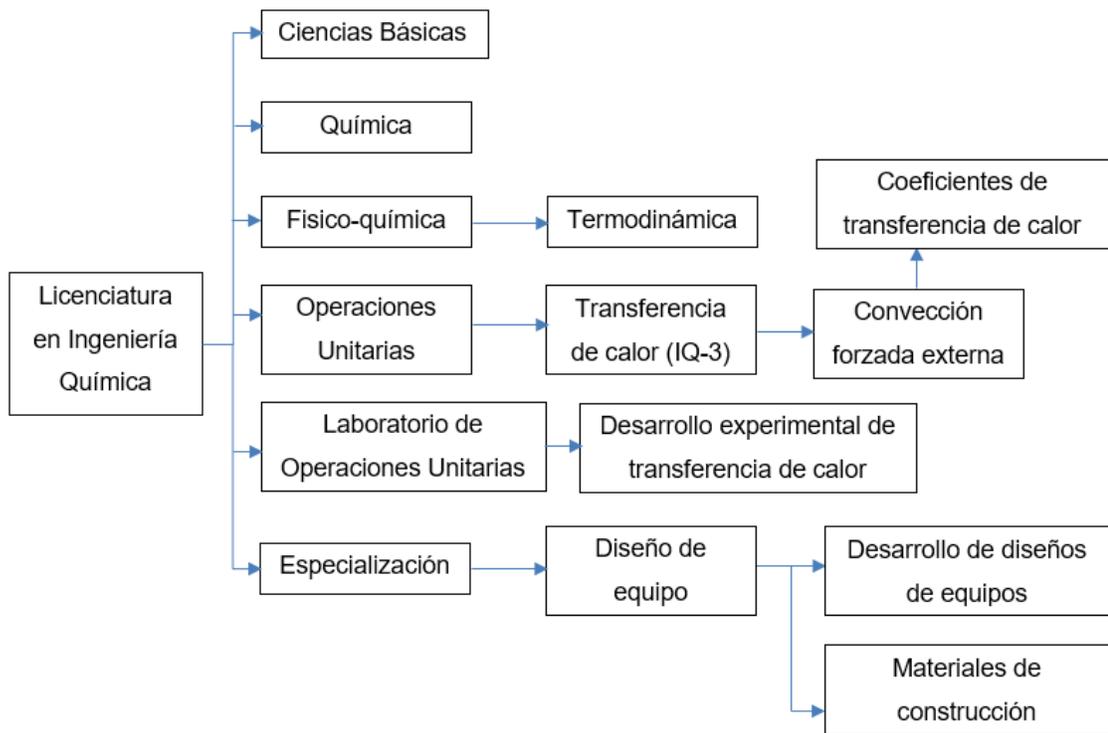
1. CENGEL, Yunus; GHAJAR, Afshin. *Transferencia de calor y masa*. Traducido por JASSO, Ericka, D'BORNEVILLE, Hernán. 4a ed. México: McGraw-Hill, 2011. 440 p.
2. CEREZO, David. *Propuesta de una práctica experimental de control automático del proceso de transferencia de calor, en el intercambiador de tubos concéntricos del Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad de San Carlos*. Trabajo de graduación Ing. Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 174 p.
3. GEANKOPLIS, Christie. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3a ed. México: Continental S.A., 1998. 1 007 p. ISBN: 978-013-93-0439-2
4. GÓMEZ, Luis. *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 de Ing. Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 1992. 42 p.
5. HERNÁNDEZ, Karen. *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 de Ing. Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016. 90 p.

6. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. 31a ed. México: Continental, 1999. 980 p. ISBN: 978-163-56-1562-3.
7. PERRY, Robert, GREEN, Dow. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7a ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1997. Núm. 2. 582 p.
8. POLIMEX, Productos de Calefacción Industrial. *Catálogo de resistencias eléctricas industriales*. [en línea]. <<http://www.polimex.mx/catalogos/Catalogo-de-Resistencias-Elctricas-Polimex-2017.pdf>>. [Consulta: agosto 2019].
9. SOLARES, María. *Diseño e implementación de equipo didáctico para el estudio de la transferencia de calor por convección forzada externa, a través de tres geometrías, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018. 159 p.
10. TORRES, Enrique; QUINTANA, Luís; VEGA, Orlando; RETIRADO, Yoalbys. *Coefficientes de transferencia de calor y pérdida de eficiencia en intercambiadores de calor de placas durante el enfriamiento de licor amoniacal*. vol. 27, Núm. 2. Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. Antonio Nuñez Jiménez, 2011. 108 p. 67-83. ISSN 1993 8012.

APÉNDICES

Apéndice 1. Requisitos académicos



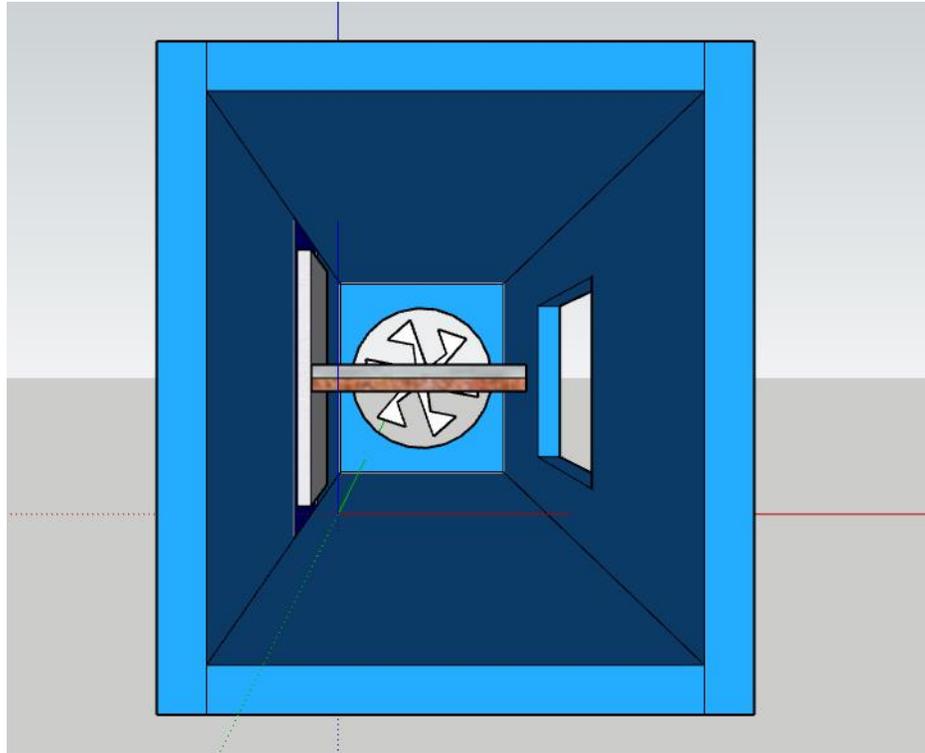
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama Ishikawa



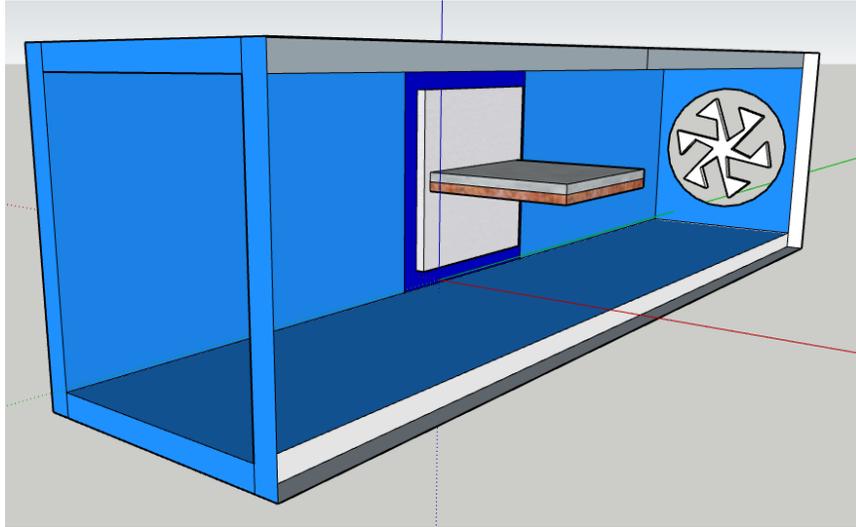
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Arreglo geométrico plano introducido en túnel**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Arreglo geométrico plano introducido en túnel corte transversal**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Valores tomados en cuenta para el diseño de las placas planas, resistencia eléctrica y plataforma**

Variable	Símbolo	Magnitud	Unidad de medida
Largo de la placa	L	0,185	m
Ancho de la placa	a	0,190	m
Espesor de la placa	e	0,019	m
Velocidad mínima (Experimental)	Vmin	0,200	m/s
Velocidad máxima (Experimental)	Vmax	0,900	m/s
Altura del túnel	Ht	0,190	m
Ancho del túnel	At	0,190	m
Área transversal del túnel	Att	0,036	m ²
Densidad del aire a 25 °C	ρ	1,184	kg/m ³
Viscosidad dinámica del aire a 25 °C	μ	1,85E-05	kg/m*s
Re crítico	Re	5,00E+05	N/A

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Carátula de programa para interpolación lineal elaborado en Microsoft Excel**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Apéndice 6. **Fórmulas involucradas en el programa para interpolación lineal elaborado con relación directamente proporcional en Microsoft Excel**

Se introducen los datos obtenidos de las tablas de información en las celdas C9, C10, F9 y F10. Se introduce el valor conocido en la celda C12 y el valor obtenido aparece en la celda F12 aplicando la fórmula:

$$=IF(C12<C9;"Error";IF(C12>C10;"Error";IF(F9>F10;"Error";IF(C9>C10;"Error";(((C12-C10)/(C10-C9))*(F10-F9))+F10))))$$

La fórmula alerta de errores si los datos introducidos no obedecen una relación directamente proporcional.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Fórmulas involucradas en el programa para interpolación lineal elaborado con relación inversamente proporcional en Microsoft Excel**

Se introducen los datos obtenidos de las tablas de información en las celdas C19, C20, F19 y F20. Se introduce el valor conocido en la celda C22 y el valor obtenido aparece en la celda F22 aplicando la fórmula:

$$=IF(C22<C19;"Error";IF(C22>C20;"Error";IF(F19<F20;"Error";IF(C19>C20;"Error";(((C20-C22)/(C20-C19))*(F19-F20))+F20))))$$

La fórmula alerta de errores si los datos introducidos no obedecen una relación inversamente proporcional.

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de emisividades de algunos materiales

TABLA 1-6

Emisividades de algunos materiales
a 300 K

Material	Emisividad
Hoja de aluminio	0.07
Aluminio anodizado	0.82
Cobre pulido	0.03
Oro pulido	0.03
Plata pulida	0.02
Acero inoxidable pulido	0.17
Pintura negra	0.98
Pintura blanca	0.90
Papel blanco	0.92-0.97
Pavimento de asfalto	0.85-0.93
Ladrillo rojo	0.93-0.96
Piel humana	0.95
Madera	0.82-0.92
Suelo	0.93-0.96
Agua	0.96
Vegetación	0.92-0.96

Fuente: CENGEL, Yunus, *Transferencia de calor y masa*, p. 28.

Anexo 2. Tabla de propiedades del aire a presión de 1 atm

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478

Fuente: CENGEL, Yunus, *Transferencia de calor y masa*, p. 884.

Anexo 3. Lector LCD de temperaturas



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 4. Controlador de velocidades



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 5. **Intercambiadores de calor de placas para la industria**



Fuente: COSMOS. *Intercambiador de calor.*
<https://intercambiadores-de-calor.mx/>. Consulta: agosto 2019.