

## REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONDENSADOR PARA EL ESTUDIO DE CONVECCIÓN FORZADA

**María Lucena, Carlos Linárez y Eduard Rodríguez**

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Vicerrectorado Barquisimeto  
mglucena@hotmail.com, carlos\_linarez@hotmail.com, eduard\_rg\_30@hotmail.com

**RESUMEN.** El rediseño y construcción de un condensador de tubos y coraza destinado al estudio de convección forzada, con y sin cambio de fase fue desarrollado con el propósito de dotar al Laboratorio de Fenómenos de Transporte de la UNEXPO Vice-rectorado Barquisimeto, de un equipo didáctico para realizar experiencias prácticas que permitan analizar los fenómenos mencionados. La investigación se realizó en tres fases: la primera fue el diagnóstico, llevada a cabo a través de la técnica de la encuesta; la segunda correspondió a la factibilidad técnico-económica, que involucró el rediseño, selección de materiales y determinación de costos; y la última fue la construcción y prueba de funcionamiento del condensador. El resultado del proyecto fue la instalación de un nuevo condensador, conformado por una coraza de vidrio Pyrex de 80 cm de largo y 10 cm de diámetro, con dos tubos de cobre de 3/4" y 3/8" de diámetro. Con la prueba de funcionamiento se comprobó que el equipo opera satisfactoriamente, permite visualizar el fenómeno de condensación en película estable y tomar la data experimental necesaria para el estudio de convección con y sin cambio de fase para diferentes flujos de agua de enfriamiento.

**Palabras clave:** Rediseño, Condensador, Convección Forzada.

---

## REDESIGN AND CONSTRUCTION OF A CONDENSER FOR THE STUDY OF FORCED CONVECTION

**ABSTRACT.** The redesign and construction of a condenser shell and tube intended for the study of forced convection, with and without changing phase, was developed with the purpose of furnishing the Transport Phenomena Laboratory of the UNEXPO Vice-rectorado Barquisimeto of an equipment to perform practical experiences that could be used to analyze such phenomena. The research was conducted in three phases. The first phase was the diagnosis, carried out through survey techniques; the second one corresponded to the techno-economic feasibility, which involved the redesign, material selection, and cost determination; and the last one the construction and operational testing of the condenser. The result was the installation of a new condenser, formed by a Pyrex glass shell of 80 cm length and 10 cm diameter, with two copper pipes of 3/4" and 3/8" in diameter. The operational testing was found that the equipment operates satisfactorily, this device allows viewing the steam condensation phenomenon on stable film and appropriately taking the experimental data needed for the calculation of the convection coefficients for different cooling water flow rates.

**Keywords:** Redesign, Condenser, Forced Convection.

## 1. INTRODUCCIÓN

En una gran variedad de sistemas industriales, específicamente mecánicos y químicos, es necesario que el calor sea transferido de un lugar a otro, o bien, de un fluido a otro. Todo esto se puede lograr por medio de los fenómenos de transferencia de calor, los cuales tienen un papel de suma importancia a nivel de ingeniería, tanto en la generación de energía, como en su aprovechamiento [1]. Entre estos fenómenos, la convección con cambio de fase, especialmente la condensación es muy común en las industrias.

En relación con lo anterior, la convección se define como un mecanismo de transferencia de calor a través de un fluido en presencia de un movimiento masivo de éste, el cual puede ser natural o forzado. Cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos, se denomina convección forzada y convección natural si el flujo se mueve por un gradiente de densidad [2]. Además en convección puede existir cambio de fase, como por ejemplo, si el fluido es un vapor simple y se pone en contacto con una superficie de temperatura ligeramente inferior al correspondiente punto de saturación, se condensará pasando inmediatamente a fase líquida.

Tales fenómenos se llevan a cabo en equipos de intercambio térmico llamados condensadores, donde el vapor pasa a líquido y éste a su vez puede ser subenfriado. Los más usados a nivel industrial por su sencillez y área de transferencia de calor ofrecida son los intercambiadores de tubos y coraza; en especial los condensadores 1-2 (un paso por la coraza y dos por los tubos), en los cuales se requiere modificaciones a la entrada del vapor a fin de evitar caídas de presión considerables en la coraza. Su diseño se fundamenta en la determinación de los coeficientes de transferencia de calor por convección tanto del lado tubo, como del lado coraza [3].

Con respecto al estudio de convección en el Pensum de Estudio de Ingeniería Química de la Universidad Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO) Vice-rectorado Barquisimeto, está contemplado en las asignaturas: Fenómenos de Transporte II, donde se imparten los conocimientos teóricos y en el Laboratorio de Fenómenos de Transporte, que está orientado a reforzar dichos conocimientos a través de la experiencia. Éste último le permite al

estudiante visualizar los procesos de Transferencia de Calor, a través de experimentos significativos, donde se requiere aplicar las leyes que rigen estos fenómenos.

En el caso específico del Laboratorio de Fenómenos de Transporte, su contenido programático contempla la realización de 12 prácticas, entre las cuales se encuentra la titulada: Estudio de la convección forzada en flujo turbulento sobre tubos rectos sobre los cuales condensa un vapor simple. Esta práctica tiene como objetivo general según la guía del laboratorio, estudiar la transferencia de calor por convección forzada sin cambio de fase dentro de tubos de diferentes diámetros y la condensación en película sobre tubos lisos, mediante la comparación entre la transferencia de calor y cantidad de movimiento [4].

En relación con este último, la práctica se efectuaba en un condensador de tubos y coraza, ubicado en el sistema de múltiples usos del laboratorio, el cual venía presentando una serie de problemas notables, tales como fugas de vapor, instrumentos de medición defectuosos y la imposibilidad de fijar un mismo caudal de agua de enfriamiento para cada uno de los tubos. Lo cual conllevaba a errores en las mediciones experimentales y por consiguiente a obtener resultados fuera de lo esperado. Lo anterior, impedía alcanzar los objetivos trazados en la práctica y el afianzamiento de los conocimientos adquiridos en la teoría.

De acuerdo a lo expuesto, esta investigación está orientada a dar la solución a la problemática anteriormente planteada, mediante el Rediseño y Construcción de un Condensador de Tubos y Coraza para el estudio de la convección forzada con y sin cambio de fase en el Laboratorio de Fenómenos de Transporte en la UNEXPO vice-rectorado Barquisimeto; lo cual beneficia a los estudiantes de Ingeniería Química, Metalúrgica e Industrial que cursan el laboratorio en esta casa de estudio. En este trabajo se presenta un primer apartado correspondiente a la metodología, la cual se abordó a través de tres fases. Se planteó realizar un diagnóstico de la necesidad de sustituir el equipo existente; determinar las especificaciones de las dimensiones y materiales del condensador; construir e instalar el equipo; diseñar el Manual Práctico de Convección Forzada y realizar la prueba de funcionamiento. A este apartado le siguen la sección de análisis de resultados y conclusiones de la investigación.

## 2. METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación responde a las características de un estudio de campo de carácter proyecto factible, el cual elabora y desarrolla una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales [5]. Esto es debido a que la propuesta desarrollada permite resolver la problemática presentada en el Laboratorio de Fenómenos de Transporte de la UNEXPO vice-rectorado Barquisimeto, en cuanto al mal estado del condensador para el estudio de la Convección Forzada, que impide el desarrollo de una de las prácticas contenidas en el programa de la asignatura. La investigación se ejecutó en tres fases, las cuales fueron: Fase I: Diagnóstico, Fase II: Factibilidad Técnico - Económica y Fase III: Desarrollo de la propuesta.

**Fase I: Diagnóstico de la Investigación.** El diagnóstico de la necesidad es un estudio que consiste en la recopilación de información, su ordenamiento e interpretación, donde se busca conocer la realidad, de tal manera de poder proponer un proyecto de acción para su mejora [6]. Es por esto, que se aplicó una encuesta a estudiantes que habían cursado la asignatura Laboratorio de Fenómenos de Transporte en la UNEXPO Vice-rectorado Barquisimeto, la que estuvo orientada a conocer su opinión basada en la experiencia vivida en el laboratorio, específicamente acerca de tres áreas de interés para esta investigación, las cuales fueron: condiciones del equipo donde realizaron la práctica de convección forzada, resultados obtenidos al procesar la data experimental y la importancia de afianzar los conocimientos teóricos de convección mediante la realización de una práctica.

El diagnóstico comprendió la realización de las siguientes actividades: Definición de la variable de estudio, la cual fue condensador; diseño del instrumento; la aplicación del mismo e interpretación de los resultados. El instrumento de recolección de datos empleados fue la encuesta, la cual se llevó a cabo en forma de cuestionario, basado en la técnica de Likert, que especifica el nivel de acuerdo o desacuerdo con una declaración. Se diseñó el cuestionario que estuvo compuesto de 10 ítems con una escala de cinco alternativas. La población la constituyó los estudiantes que cursaron el Laboratorio de Fenómenos de Transporte en el lapso 2012-II y la muestra fue 37,5 % del total de la población, la cual garantiza un nivel elevado de representatividad [7]. A fin de validar la confiabilidad del instrumento se empleó el coeficiente

Alpha de Cronbach, el cual se orienta a evaluar la consistencia interna de la prueba [8]. Finalmente, los resultados de la encuesta fueron analizados y discutidos y sirvieron de base para el desarrollo de la investigación.

**Fase II: Factibilidad Técnica-Económica.** La parte técnica consistió en el rediseño del equipo, que involucró la determinación de las dimensiones del nuevo condensador y la selección de los materiales tanto para la coraza, como para los tubos y los accesorios necesarios para su funcionamiento e instalación. El rediseño se llevó a cabo mediante un algoritmo matemático de ensayo y error, fundamentado en el balance de energía dentro de un intercambiador de tubos y coraza [3], y en las ecuaciones empíricas de convección con y sin cambio de fase que proporciona la literatura [9]. Este procedimiento permitió conocer el diámetro de la coraza, diámetro y longitud de los tubos que garantizan un flujo de condensado suficiente, para visualizar el fenómeno de condensación en película estable y que a su vez permite el buen desarrollo de la práctica. Adicionalmente, se realizaron las siguientes actividades: desmontaje del equipo existente; verificación del estado de las piezas para una posible reutilización; definición de rangos de operación del equipo, en lo referente a la alimentación de agua y vapor; elección del tipo de válvulas, considerando el tipo fluido y condiciones operacionales y determinación del lugar para instalar el equipo.

La factibilidad económica se determinó a partir del listado todas las piezas necesarias y sus costos, se realizó el análisis de costo-calidad de todos los insumos necesarios, se seleccionaron las más adecuadas considerando su calidad y la posibilidad de ser adquiridas y se buscó el financiamiento de los mismos. Para lo cual se contó con el aporte del Departamento de Ingeniería Química de la UNEXPO Vice-rectorado Barquisimeto y recursos propios. El ensamblaje e instalación del equipo se realizó con ayuda del personal técnico de la universidad, reduciendo los costos por mano de obra.

**Fase III: Desarrollo de la Propuesta.** Esta fase contempló la construcción del equipo, elaboración de un nuevo manual de la práctica y la realización de la prueba de funcionamiento. Para la construcción del equipo fue necesario la revisión del estado de las tomas para la alimentación del vapor; sustitución de tuberías corroídas a fin de lograr la correcta instalación del

equipo; ensamble de cada una de las partes; construcción del drenaje; ubicación de los equipos de medición; realización de prueba de inyección de vapor y revestimiento de los tubos con los colores normalizados, fueron consideradas las pautas de la NORMA COVENIN 253 para la instalación e identificación de tuberías [10].

La elaboración del nuevo Manual de Práctica para Convección Forzada con y sin cambio de fase, contempló el instructivo de arranque, objetivos de la práctica, procedimiento experimental, además del diagrama de flujo del equipo y sus especificaciones. Éste fue usado para el desarrollo de la Prueba de Funcionamiento del equipo, con el fin de comprobar la correcta operación del mismo y el logro de los objetivos planteados.

### 3. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de la investigación según las fases descritas en la metodología:

#### Fase I. Diagnóstico

La encuesta aplicada a los estudiantes que cursaron el Laboratorio de Fenómenos de Transporte presentó un alto nivel de confianza según el Coeficiente de Alfa de Cronbach, alcanzando un valor de 0,97. Sus resultados revelaron que en cuanto a las condiciones del equipo donde realizaron la práctica de convección forzada, el 87% afirma, que el intercambiador de calor estaba deteriorado, presentaba fugas y que su funcionamiento era complicado. Además que la data experimental fue difícil de tomar; en especial el caudal de agua de enfriamiento, el cual no lograron mantener constante mientras realizaban la experiencia.

Por otra parte, acerca de los resultados obtenidos al procesar la data experimental, el 80% afirmó que no lograron comprobar el comportamiento teórico del coeficiente de transferencia de calor por convección interna al incrementar el caudal de agua y el 100% que tampoco logró comprobar el comportamiento teórico del mismo coeficiente, al mantener fijo el caudal de agua y disminuir

el diámetro del tubo. Y la totalidad de los encuestados no lograron realizar una buena comparación de los coeficientes de transferencia de calor por convección, obtenidos por los diferentes métodos de cálculo a partir de la data experimental.

Asimismo, el 100% de los encuestados considera que esta práctica es fundamental para profundizar el aprendizaje sobre convección, poder estudiar la condensación en película estable, visualizar este fenómeno y analizar las variables que afecta la convección forzada dentro de tubos. Con los resultados obtenidos se comprobó la necesidad de dotar al Laboratorio con un nuevo equipo adecuado y didáctico para el estudio de la convección forzada con y sin cambio de fase, que le permita al alumno lograr todos los objetivos planteados en la práctica diseñada para tal fin.

## Fase II. Estudio de la Factibilidad Técnica y Económica

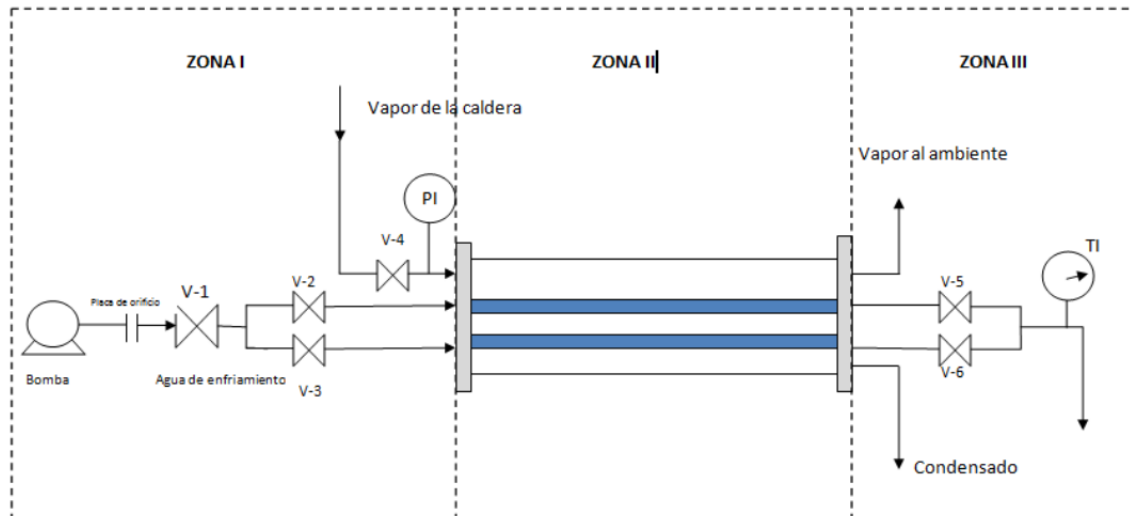
El rediseño del equipo se realizó de acuerdo con el procedimiento de cálculo mencionado en la metodología y tomando como base la selección de las piezas reutilizables más importantes del equipo original, como lo fueron los dos tubos de cobre y sus diferentes piezas de conexión del mismo material. Las dimensiones del equipo se presentan a continuación en el cuadro 1.

**Tabla 1. Dimensiones del condensador para el estudio de convección forzada.**

<b>Coraza</b>	<b>Tubos</b>
Diámetro: 10 cm	N° de tubos: 2
Longitud: 80 cm	Diámetro: 3/4" y 3/8"
Material: Vidrio Pyrex	Material: Cobre (cat. 80)

El condensador posee tres zonas que se visualizan en la figura 1. La zona I es la alimentación del condensador; para controlar el flujo de vapor se dispone de una válvula reguladora de presión de diámetro 3/4" (V-4) y de un indicador de presión (PI) y para controlar el flujo de agua de enfriamiento se tienen tres válvulas de 1" de diámetro (V-1; V-2; V-3). En la zona II, se tienen dos tubos internos de cobre de diámetros diferentes (3/8" y 3/4") contenidos en una coraza de vidrio Pyrex resistente a presiones moderadas y altas temperaturas. En la zona III, se tienen dos válvulas de 1" de diámetro para la salida del agua (V-5; V-6), con un indicador de temperatura

(TI) a la salida de cada uno, además de una trampa de vapor a la salida del equipo para la obtención del condensado. Los tubos de cobre, válvula reguladora de presión y la trampa de vapor son piezas seleccionadas como reutilizables provenientes del equipo anterior.



**Figura 1. Diagrama del condensador.**

Las principales características de condensador rediseñado son las siguientes:

- Fácil mantenimiento.
- Permite calcular coeficientes de transferencia de calor internos, coeficientes de película ( $h_i$ ) para cada uno de los tubos y cada caudal de agua de enfriamiento.
- Maneja flujo de vapor de agua, aunque también puede extenderse su uso para otros fluidos que no afecten el material de los tubos ni la coraza de vidrio Pyrex.
- Condiciones de operación: Presión atmosférica y temperaturas entre 0-150 °C.
- Las mediciones que permite realizar son: Temperatura de entrada y salida del agua de enfriamiento, flujo de condensado, temperatura del condensado.
- Permite la observación del fenómeno de condensación por gotas y de película.

La coraza fue fabricada de vidrio Pyrex con el propósito de que el estudiante pueda visualizar el fenómeno de condensación, lo que genera un atractivo extra en el aprendizaje de la práctica. Los tubos son de cobre por lo que poseen alta conductividad térmica, ideales para el proceso de condensación de vapor. Los extremos del condensador (flanges) fueron construidos de aluminio,



debido a su alta resistencia térmica en relación a las condiciones de operación del equipo, además de ser un material de bajo costo y de fácil tratamiento para su diseño, fundición y moldeado. Se determinó un diámetro para cada flange de 18 cm y 2 cm de espesor, con lo cual se ajusta al tipo de conexiones, tubos y coraza seleccionados.

Con respecto a las tuberías y accesorios, se seleccionó acero galvanizado para los mismos, ya que es el material recomendado en la literatura para las tuberías de vapor a las presiones entre 0-80 psi. Adicionalmente, los recubrimientos galvanizados presentan las siguientes ventajas: alta duración, resistencia mecánica elevada, protección integral de las piezas (interior y exteriormente), triple protección: barrera física, protección electroquímica y autocurado y fácil de pintar [11].

Por otra parte, se hizo una búsqueda de presupuestos para establecer bajo una evaluación de costo-calidad la opción más satisfactoria para la compra de los mismos. Algunas piezas del condensador desmontado fueron reutilizadas tales como: dos tubos de cobre, conexiones de cobre, trampa de vapor, válvula reguladora de presión (vapor), bomba y placa de orificio lo cual hizo más factible económicamente el desarrollo del proyecto. A continuación se presenta la Tabla 2 con los costos de cada material adquirido con recursos de los autores y colaboradores.

### **Fase III. Desarrollo de la Propuesta**

#### ***Construcción del equipo***

Basados en la determinación de la longitud de los tubos, longitud y diámetro de la coraza y el diseño de los flanges, se procedió a la construcción del equipo. Es necesario resaltar que la elaboración de los flanges, se realizó con la colaboración del departamento de Ingeniería Metalúrgica, específicamente del personal técnico del Laboratorio de Fundición y del Departamento de Ingeniería Mecánica, donde mecanizaron y tornearon los estas piezas de tanta importancia.

**Tabla 2. Listado de costos de materiales usados en el equipo.**

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo (Bs.)</b>
1	Tubo de vidrio Pyrex 10 cm de diámetro x 80 cm de largo	8624
1	Válvula de Compuerta (Bronce) 1" de diámetro	149,37
4	Válvula de globo Galvanizadas 1" de diámetro	179,35
8	Codo 90 x 1" galvanizado	18,43
4	Niple Galvanizado 1" x 2 cm de largo	18,92
4	Niple Galvanizado 1" x 1 cm de largo	14,03
4	Niple Galvanizado corrido 1"	16,07
1	Niple Galvanizado 3/4" x 5 cm de largo	24,96
1	Niple Galvanizado 3/4" x 12 cm de largo	30,00
1	Niple Galvanizado 3/4" x 15 cm de largo	32,00
1	Niple Galvanizado 3/4" x 25 cm de largo	40,00
1	Niple Galvanizado 3/4" x 35 cm de largo	45,00
2	TEE 1" galvanizada	26,56
1	Tubo galvanizado 3/4" x 1,40 m de largo	387,41
1	Adaptador de bronce (para manómetro)	125,00
4	Tubos para soporte	79,25
1	Manguera para alta presión	272,00
1	Manómetro 1/2" rango 0-30 PSI	799,20
2	Teflón PROF 3/4	24,96
1	Diseño y fundición de flanges de aluminio	250,00
2	Mecanizado flanges de aluminio	200,00
-	Torneado flanges	700,00
2	Pulido de flanges	150,00
2	Silicón rojo	100,00
-	Bases para equipo	400,00
-	Otros	482
-	Mano de obra	1200
-	Conexiones	500
<b>TOTAL</b>		<b>18379,09</b>

En el mismo orden de ideas, se adquirieron los demás accesorios y tuberías necesarias para la alimentación y descarga de agua de enfriamiento y vapor, así como la evaluación del funcionamiento de la placa de orificio y su posterior calibración. Las conexiones y ensamble de todo el equipo se realizó con la colaboración del personal técnico del Laboratorio de Fenómenos de Transporte del Departamento de Ingeniería Química.

El condensador de tubos y coraza construido para el Laboratorio de Fenómenos de Transporte del Departamento de Ingeniería Química destinado al estudio de convección forzada se presenta en la Figura 2. El equipo está formado por una coraza de vidrio, por la cual fluye el vapor proveniente de la caldera y se encuentra sostenida por dos tapas de aluminio, en ella se encuentran dos tubos de cobre, donde circula el agua de enfriamiento para la condensación del vapor. El flujo de vapor se controla mediante una válvula de presión, que permite mantener las condiciones de operación (Figura 3).



**Figura 2. El condensador para el estudio de convección forzada.**

Los tubos son de diferente diámetro y el flujo de agua es controlado a través de válvulas a la entrada y la salida de éstos. Además se cuenta con una placa de orificio, la cual funciona como medidor de flujo y permite controlar condiciones del sistema. El condensado es retirado por un lado del equipo, permitiendo realizar mediciones cómodamente (Figura 4).



Figura 3. Zona de alimentación



Figura 4. Zona de descarga

### *Manual Práctico Convección Forzada con y sin Cambio de Fase*

Se realizó un nuevo diseño de la práctica de laboratorio titulada “Convección Forzada con y sin cambio de fase”, debido a que el condensador donde se lleva a cabo la práctica es un equipo diferente, didáctico y que posee un procedimiento de arranque completamente diferente al que se tenía.

Los objetivos fueron modificados de la siguiente manera:

**Objetivo General:** Estudiar la convección forzada con y sin cambio de fase, mediante la condensación de vapor de agua sobre tubos lisos de diferentes diámetros.

#### **Objetivos Específicos:**

- Calcular el coeficiente de transferencia de calor interno y externo con el uso de un algoritmo matemático basado en la suposición de la temperatura de pared externa de los tubos para cada flujo de agua de enfriamiento.
- Calcular el coeficiente de transferencia de calor interno ( $h_i$ ) para cada uno de los tubos y cada caudal de agua de enfriamiento con el uso de las relaciones empíricas basadas en números adimensionales.
- Calcular el coeficiente de transferencia de calor interno ( $h_i$ ) para cada tubo y cada caudal de agua de enfriamiento mediante el uso de analogías con cantidad de movimiento.

- Comparar los resultados obtenidos de los coeficientes de transferencia de calor internos, calculados por diferentes métodos.

Asimismo, se presenta un diagrama del equipo en el que se identifican cada una de las partes principales; el procedimiento de arranque, que consta de cinco pasos esenciales para lograr un buen funcionamiento del equipo; el procedimiento experimental, conformado por ocho pasos para lograr el intercambio térmico deseado en cada tubo; los cálculos y determinaciones a realizar y finalmente las medidas de seguridad [12].

### ***Prueba de funcionamiento***

La prueba de funcionamiento, cuyo fin principal fue corroborar que el equipo rediseñado e instalado permite lograr los objetivos planteados en la práctica de “Convección Forzada con y sin Cambio de Fase”, se llevó a cabo siguiendo cada una de las pautas señaladas en el nuevo manual de la práctica. Durante la misma se midieron las temperaturas del agua a la entrada y salida del tubo, así como la temperatura, volumen y tiempo de condensado y flujo de agua de enfriamiento. Lo cual se realizó para diferentes caudales de agua de enfriamiento y para cada tubo; no se observaron fugas, ni fallas en los instrumentos de medición. El cuadro 3 muestra la data experimental de la prueba.

**Tabla 3. Datos experimentales de la prueba de funcionamiento**

Tubo (pulg)	Agua			Condensado		
	$\Delta P$ (mmHg)	$T_e$ (°F)	$T_s$ (°F)	V (mL)	t (s)	$T_s$ (°F)
3/8	10	79,70	104	14,03	14,03	172,4
	25	79,70	93,2	9,84	9,84	172,4
3/4	15	79,70	100,4	22,5	14,00	172,4
	25	79,70	93,2	16	9,53	172,4
	40	79,70	89,6	15	8,54	172,4
	60	79,70	87,8	23	12,06	172,4
	90	79,70	87,8	23	10,9	172,4

Se realizaron los cálculos de los coeficientes de transferencia de calor internos y externos con el uso del algoritmo matemático basado en la suposición de una temperatura de pared externa de los tubos y para cada flujo de agua de enfriamiento (Cuadro 4). Puede observarse, que el

comportamiento del coeficiente de convección interno ( $h_i$ ) aumenta a medida que se incrementó el caudal en cada tubo, tal y como se esperaba producto del aumento de la velocidad del fluido y por tanto de la turbulencia dentro de los tubos, lo que permite mayor transferencia de calor en el sistema. De igual forma, para ambos tubos el comportamiento del  $h_o$  es ascendente, lo que concuerda con la teoría, ya que al aumentar la tasa de flujo de agua de enfriamiento por los tubos, existe mayor transferencia de calor generando un incremento en el flujo de condensado.

**Tabla 4. Coeficientes de convección interno y externo por método iterativo.**

Tubería (pulg)	Flujo ( $\text{ft}^3/\text{h}$ )	$h_i$ ( $\text{BTU}/\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$ )	$h_o$ ( $\text{BTU}/\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$ )
3/8	7,136	502,34	2967,69
	16,90	669,99	2700,98
3/4	7,022	173,34	3105,97
	17,17	279,44	2664,08
	24,80	296,53	2574,59
	31,45	303,68	2606,33
	38,95	390,69	2413,99

Asimismo, se determinó el coeficiente de convección interno para cada tubo y diferentes tasas de flujo de agua de enfriamiento por el método de ecuaciones empíricas y por la analogía de Reynolds y fueron comparados en el Cuadro 5.

**Tabla 5. Comparación de coeficientes de convección interno.**

Flujo ( $\text{ft}^3/\text{h}$ )	Tubería (pulg)	Método Iterativo ( $\text{BTU}/\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$ )	Región de entrada ( $\text{BTU}/\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$ )	Notter – Sleicher ( $\text{BTU}/\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$ )	Analogía de Reynolds ( $\text{BTU}/\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$ )
7,00	3/4"	173,34	325,56	326,674	279,96
	3/8"	502,34	1337,45	1390,578	936,38
17,00	3/4"	279,44	621,74	619,691	420,15
	3/8"	669,99	2575,49	2731,069	1418,36

Se puede observar, que para el tubo de menor diámetro el coeficiente de convección interno ( $h_i$ ) es siempre mayor al del tubo de mayor diámetro, esto debido a que la velocidad de flujo dentro del tubo de 3/8" es mayor al de 3/4", lo que se traduce en un aumento en la turbulencia y por tanto en mayor transferencia de calor. Comparando ambas ecuaciones empíricas, puede

observarse un comportamiento del hi muy cercano, siendo este patrón el esperado, ya que ambas ecuaciones consideran un número variables del proceso similares.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo esperado, verificándose que el equipo funciona de manera correcta, estando apto y aprobado para su uso en el Laboratorio de Fenómenos de Transporte.

#### 4. CONCLUSIONES

El rediseño y construcción de un condensador para el estudio de Convección Forzada permitió dotar al Laboratorio de Fenómenos de Transporte del Departamento de Ingeniería Química de la UNEXPO Vice-rectorado Barquisimeto, de un equipo didáctico para la realización de la práctica mencionada. Esta investigación inició con la aplicación de una encuesta, la cual presentó un alto nivel de confianza según el Coeficiente de Alfa de Cronbach (0,97) y sus resultados permitieron comprobar la necesidad de sustituir el equipo de intercambio térmico disponible en el laboratorio, con el fin alcanzar los objetivos planteados en la práctica diseñada para tal fin.

Se rediseñó, construyó e instaló un nuevo condensador de tubos y coraza, el cual consta de una coraza de 10 cm de diámetro y 80 cm de longitud, elaborada de vidrio Pyrex, resistente al calor y tiene la ventaja de permitir la visualización del fenómeno de condensación en película, lo que facilita su comprensión y afianza los conocimientos teóricos adquiridos. Posee dos tubos de cobre de 3/4" y 3/8" de diámetro respectivamente, por los cuales circula agua de enfriamiento para lograr la condensación del vapor que fluye en la coraza a presión atmosférica.

Se elaboró un nuevo Manual Práctico de Convección Forzada con y sin cambio de Fase, el cual contiene: el objetivo general y específicos, procedimiento experimental, diagrama del condensador y los cálculos que se deben efectuar para la realización de la práctica. Este manual sirvió de guía para llevar a cabo la prueba de funcionamiento, con la cual se comprobó la operatividad del equipo; no se observaron fallas, ni fugas. Adicionalmente, una vez procesados los datos experimentales, se obtuvieron resultados que concuerdan con lo esperado, verificándose

que el equipo funciona de manera correcta, estando apto y aprobado para su uso en el Laboratorio de Fenómenos de Transporte.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Cuadrado, K. Diseño, construcción y pruebas de un Intercambiador de calor de carcasa y tubos para laboratorio de térmicas de la facultad de mecánica. Escuela superior politécnica de Chimborazo, Ecuador. [Documento en línea]. 2010. [Consulta: 2012, Julio 19] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/-893/1/15T00461.pdf>

[2] Cengel, Y y Ghajar, A. Transferencia de Calor y Masa. Cuarta Edición. México. Editorial McGraw-Hill. 2011. Pp 373-415.

[3] Kern, D. Procesos de Transferencia de Calor. Trigésima primera reimpresión. México. Editorial McGraw-Hill. 1999. Pp 159-212, 301-326.

[4] Almaso, R. y Camacho, D. Guía práctica del laboratorio de Fenómenos de Transporte, Universidad Nacional Politécnica Experimental “Antonio José de Sucre”. Barquisimeto, Venezuela. 2000. Pp 28-34.

[5] Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales. Cuarta Edición. Caracas, Venezuela. Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador. 2006. Pp 17-24.

[6] Rodríguez J. Guía de elaboración de diagnósticos. [Documento en línea]. 2007. [Consulta: 2013, Enero 31]. Disponible en: <http://www.cauqueva.org.ar/archivos/gu%C3%ADa-de-diagn%C3%B3stico.pdf>.

[7] Ramírez, T. Como hacer un proyecto de investigación. Caracas, Venezuela. Editorial Panapo. 1999.



[8] Milton Confiabilidad y coeficiente Alpha de Cronbach. Universidad Rafael Beloso Chacín. [Documento en línea]. (sin fecha). [Consulta: 2013, Enero 24] Disponible en: <http://www.urbe.edu/publicaciones/telos/ediciones/pdf/vol-12-2/nota-2.PDF>.

[9] Incropera, F. y Dewitt, D. Fundamentos de transferencia de calor. Cuarta Edición. México. Editorial Prentice Hall. 1999. Pp 284-344.

[10] Norma Venezolana COVENIN 253. Consejo Superior N° 1999-13. 2da. Revisión. [Documento en línea]. 1999, Diciembre 14. [Consulta: 2014, Enero 16]. Disponible en: [www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/253-99.pdf](http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/253-99.pdf).

[11] Vásquez. Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. 2001.

[12] Linarez, C. y Rodríguez, E. (2014). Rediseño y construcción de un condensador de tubos y coraza para el estudio de convección forzada con y sin cambio de fase. Trabajo Especial de grado no publicado. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” UNEXPO. Barquisimeto, Venezuela. 2014. Pp 56-60.