



UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR  
DEPARTAMENTO DE TERMODINÁMICA Y FENÓMENOS DE TRANSPORTE  
LABORATORIO DE FENÓMENOS DE TRANSPORTE

# LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR TF-2252



SARTENEJAS, ABRIL 2008



UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR  
DEPARTAMENTO DE TERMODINÁMICA Y  
FENÓMENOS DE TRANSFERENCIA

**GUÍA PARA EL LABORATORIO DE:  
TF-2252**

*Esta guía fue elaborada por el personal de la Sección de Fenómenos de Transporte.  
La actualización y recopilación de esta edición fue realizada por la profesora:*

*Joselin Moreno*

*Silvia Wilinski*

*Queda terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de esta guía sin la aprobación de la  
Sección de Fenómenos de Transporte.*

## ÍNDICE

	Pág.
NORMAS DEL LABORATORIO	1
1. Normas de las Prácticas	1
2. Normas de Seguridad	2
REDACCIÓN DE UN INFORME TÉCNICO	4
1. Presentación del Informe	4
2. Contenido del Informe	6
3. Gráficos	12
4. Tablas	13
5. Presentación	13
6. Extensión	13
7. Evaluación	14
PRÁCTICA 1C: PERFILES DE TEMPERATURA	
A. Objetivos	14
B. Fundamentos Teóricos	14
C. Descripción del Equipo	17
D. Metodología	18
E. Cálculos	19
F. Cuestionario	19
G. Bibliografía	20
PRÁCTICA 2C: CONDUCCIÓN NO ESTACIONARIA	
A. Objetivos	22
B. Fundamentos Teóricos	22
C. Descripción del Equipo	23
D. Metodología	23
E. Cálculos	24
F. Cuestionario	24
G. Bibliografía	25
PRÁCTICA 4C: DILATACIÓN TÉRMICA	

A. Objetivos	26
B. Fundamentos Teóricos	26
C. Descripción del Equipo	29
D. Procedimiento Experimental	31
E. Cálculos	32
F. Cuestionario	32
G. Bibliografía	33
<b>PRÁCTICA 6C: INTERCAMBIODAR DE FLUJO CRUZADO</b>	
A. Objetivos	34
B. Fundamentos Teóricos	34
C. Descripción del Equipo	36
D. Procedimiento Experimental	38
E. Cálculos	39
F. Cuestionario	40
G. Bibliografía	40
<b>PRÁCTICA 7C: INTERCAMBIADOR DE CALOR DE DOBLE TUBO</b>	
A. Objetivos	42
B. Fundamentos Teóricos	42
C. Descripción del Equipo	44
D. Procedimiento Experimental	49
E. Cálculos	51
F. Cuestionario	51
G. Bibliografía	52
H. Apéndice	53
<b>PRÁCTICA 9C: INTERCAMBIADOR DE CALOR DE FLUJO LAMINAR VISCOSO</b>	
A. Objetivos	56
B. Fundamentos Teóricos	56
C. Descripción del Equipo	57
D. Precauciones y Advertencias	60
E. Cálculos	60
F. Cuestionario	61

G. Bibliografía	62
<b>PRÁCTICA 10C: SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN</b>	
A. Objetivos	63
B. Fundamentos Teóricos	63
C. Descripción del Equipo	66
D. Procedimiento Experimental	68
E. Cálculos	71
F. Cuestionario	71
G. Bibliografía	71
H. Anexo	72
<b>PRÁCTICA 1R: RADIACIÓN TÉRMICA</b>	
A. Objetivos	73
B. Fundamentos Teóricos	73
C. Descripción del Equipo	75
D. Procedimiento Experimental	76
E. Cálculos	78
F. Cuestionario	78
G. Bibliografía	79
<b>APÉNDICE A: PROCEDIMIENTO BÁSICO PARA UTILIZAR UN EXTINTOR PORTÁTIL</b>	<b>80</b>

## **NORMAS DEL LABORATORIO**

### **1. Normas de las Prácticas**

1.1. Las prácticas se llevarán a cabo cada 15 días. La semana anterior a la ejecución de la experiencia se realizará un pre-laboratorio cuyo objetivo fundamental es que los estudiantes, con la ayuda de una guía preparada para tal fin, comprendan el funcionamiento del equipo, revisen los fundamentos teóricos en que se basa la práctica en cuestión y conozcan el procedimiento experimental que llevarán a cabo la semana siguiente.

1.2. La duración máxima de las prácticas (al igual que del pre-laboratorio) es de 3 horas, pues se considera que si se le ha sacado todo el provecho necesario al pre-laboratorio, el tiempo fijado es suficiente y por tanto no se dará margen adicional, a menos que problemas ajenos a la práctica (fallas en el equipo, fallas en el suministro de agua o de electricidad) lo ameriten.

1.3. Se dará un margen de 15 minutos al comienzo de cada práctica o pre-laboratorio para la llegada de los alumnos, pasado este tiempo se cerrará la puerta del laboratorio y no se podrá efectuar dicha actividad ni recuperarla en otra ocasión.

1.4. Sólo se podrá recuperar una práctica bajo la condición que el estudiante presente un certificado que justifique la inasistencia a la misma.

1.5. En caso de que fallas en los equipos o servicios del laboratorio impliquen la imposibilidad de realizar una práctica, su recuperación se hará cuando el profesor lo considere conveniente.

1.6. El informe deberá ser realizado según las normas señaladas en la sección siguiente y se entregará después de efectuada la práctica, en caso de retraso se permitirá su entrega después de la fecha prevista con la penalización que considere el profesor

1.7. La evaluación del curso se hará estrictamente según el criterio del profesor. La actuación del estudiante durante la práctica será tomada en cuenta como parte de la evaluación. Esta evaluación incluirá un interrogatorio, una prueba escrita o ambas.

1.8. Los equipos y/o materiales dañados por los estudiantes, deberán ser repuestos, ya que para la inscripción en el trimestre siguiente se le exigirá a los alumnos estar solventes con el laboratorio. Al

inicio de la práctica usted deberá realizar un inventario con la ayuda de una planilla (que se encuentra dentro de la gaveta correspondiente a la práctica) que contiene una lista de los materiales requeridos para la realización de la práctica, si usted observa alguna anomalía o falta de los equipos a utilizar, este es el momento para informarle a su profesor con la planilla llena por uno de los integrantes del equipo; al final de la práctica deberá llenar otra planilla similar y reportar si usted dañó algún material del laboratorio (si esto ocurre usted estará insolvente con la unidad de laboratorios hasta no reponer lo que averió).

1.9. Los datos experimentales tomados en el laboratorio deberán ser registrados por duplicado, ya que se debe entregar una copia al profesor al finalizar la experiencia práctica. Se recomienda traer papel carbón.

## 2. Normas de Seguridad

- 2.1. El laboratorio NO es un sitio para jugar. Nunca descuide su práctica.
- 2.2. No realice experimentos para los que no esté autorizado o entre a un sitio prohibido.
- 2.3. Mantenga su sitio de trabajo limpio en todo momento: un laboratorio limpio es un laboratorio seguro.
- 2.4. Bote los desperdicios en las papeleras, no en los fregaderos, canales o en el piso.
- 2.5. No ingiera alimentos o bebidas en el laboratorio.
- 2.6. Use calzado cerrado y pantalón, pues lo protegerán del contacto directo con líquidos derramados u objetos que puedan causarle alguna lesión.
- 2.7. Mantenga su cabello recogido.
- 2.8. No toque superficies calientes sin la debida protección.
- 2.9. No fume.
- 2.10. No trabaje solo, recuerde que forma parte de un equipo: *su compañero puede necesitarlo.*
- 2.11. Si utiliza sustancias químicas:
  - Nunca intente saborear y evite respirar los reactivos: ***considere que todos los reactivos son tóxicos.***
  - Nunca llene una pipeta con la boca.
  - Etiquete todos los frascos que utilice.
  - Devuelva los frascos inmediatamente a su estante.
  - El material roto y los reactivos sobre la superficie de trabajo deben limpiarse inmediatamente (consulte antes con el profesor).
  - Use bata de Laboratorio.

- Use guantes para manejar reactivos peligrosos.
- Nunca deje de reportar síntomas extraños inmediatamente al profesor (por ejemplo: dolores de cabeza, vértigos, etc.)

2.12. Ubique los extintores de incendio y conozca su operación (Apéndice A).

2.13. Ubique la salida de emergencia.

2.14. Notifique cualquier imprevisto al profesor.

RECUERDE, ante cualquier emergencia: MANTENGA LA CALMA y busque ayuda.

BOMBEROS USB: ext. 111 ó 3909.

VIGILANCIA: ext. 3009 (las 24 horas)

4000

## REDACCIÓN DE UN INFORME TÉCNICO

La buena redacción de un informe técnico es muy importante, ya que éste es el medio de comunicación entre los profesionales de distintas especialidades. Se debe recordar que un informe será leído por otras personas y por esto debe ser lo más claro y conciso posible, además de objetivo y persuasivo.

Generalmente los informes técnicos están compuestos por: sumario o resumen, introducción, fundamentos teóricos, resultados, discusión, conclusiones y por último referencias y/o bibliografía. Los informes de laboratorio además de las partes anteriormente mencionadas, contienen una descripción del equipo a utilizar, el procedimiento de la práctica, los datos experimentales y los ejemplos de cálculo.

### 1.- Presentación del Informe

A continuación se describen las condiciones mínimas que debe cumplir el informe de laboratorio:

Se usará papel bond blanco base 20, tamaño carta. Las hojas no deben tener rayas ni perforaciones. La escritura se hará a espacio y medio (1,5 pto.), por una sola cara del papel y preferiblemente a computadora. Si el informe contuviera algún apartado manuscrito éste deberá realizarse en tinta negra. Se usará un solo tipo de letra en todo el trabajo (Times New Roman 12). El margen de la izquierda será de 3 cm y los otros márgenes de 2,5 cm. Se usará la misma sangría para todo el texto. Existen dos formas de espaciado: la primera incluye dos ENTER (Intro) sin dejar sangría; ó un ENTER con sangría. A continuación se presenta un ejemplo para cada caso:

#### Caso 1

**La refrigeración es un proceso en donde se transmite calor desde un sistema de baja temperatura, a otro de alta temperatura, efectuando trabajo sobre el sistema.**

**Oliver Evans (1755-1819) fue el primero en describir el ciclo mecánico de refrigeración, constituido por evaporador, compresor, condensador y dispositivo de expansión”**

#### Caso 2

**“La refrigeración es un proceso en donde se transmite calor desde un sistema de baja temperatura, a otro de alta temperatura, efectuando trabajo sobre el sistema.**

**Oliver Evans (1755-1819) fue el primero en describir el ciclo mecánico de refrigeración, constituido por evaporador, compresor, condensador y dispositivo de expansión”**

El tipo de conjugación más comúnmente utilizado en la redacción de informes técnicos es el pasivo. Bajo ningún concepto deberá usarse la primera persona del singular o plural. Las cifras enteras deberán separarse de los decimales por comas y no por puntos. Las páginas previas a la Introducción se numerarán con cifras romanas minúsculas, comenzando con la primera página del Índice, la cual será la número “i”. El número de cada página se colocará en la esquina superior derecha excepto la primera página de cada capítulo, la cual deberá contarse pero no llevará explícito el número de paginación.

**Portada:** debe incluir centrado en la parte superior el siguiente membrete:



**UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR**  
**Unidad de Laboratorios - Laboratorio A**  
**Sección Fenómenos de Transporte**  
**Laboratorio de Transferencia de Calor (TF-2252)**

Centrado en la mitad de la página, se coloca el título. Este debe ser lo más explícito posible, de manera que en él se especifique claramente la actividad realizada.

La identificación de los integrantes del grupo de trabajo debe ir en la parte inferior derecha. Cada miembro del equipo estará identificado con su nombre y número de carnet.

Finalmente, en la parte inferior de la hoja y centrada se coloca la fecha de entrega del informe:

**Sartenejas, 01 de Mayo de 2008**

Los títulos del informe pueden ser de primero, segundo o tercer orden. Todos los títulos indicados como secciones principales son de primer orden y deben ir en letras mayúsculas, en el tope de la página, por lo general van centrados y no se numeran.

Los títulos de segundo orden se colocan con el mismo margen con que se viene escribiendo y pueden numerarse. La primera letra de cada palabra debe ir en mayúscula; por ejemplo: La Ley de Fourier.

Los títulos de tercer orden pueden o no numerarse, van en el mismo margen con que se viene escribiendo y sólo la primera palabra se comienza con mayúscula. Por ejemplo, bajo el título de segundo orden: La Conductividad Térmica, puede hacerse referencia a: Efectos de la temperatura

(título de tercer orden).

## 2.- Contenido del Informe

A continuación se indica el contenido de cada una de las secciones principales:

**2.1.- Sumario.** No lleva título de segundo ni tercer orden. Es un párrafo corrido (escrito en tiempo pasado) que resume el informe; debe contemplar los siguientes puntos: objetivo del trabajo, equipo utilizado, procedimiento empleado para cumplir estos objetivos, resultados, discusión muy breve, conclusiones y recomendaciones (si las hay). Por ejemplo:

“En esta práctica se estudió la transferencia de masa de sólidos suspendidos en un tanque agitado, con el objetivo de hallar una correlación para el coeficiente de transferencia de masa con respecto al número de Reynolds. Para esto se hicieron dos experimentos donde se utilizó un reactor de vidrio con 1 L de agua destilada a una temperatura de 40°C, se colocaron 20 pastillas de ácido benzoico en cada caso; el reactor se colocó en una camisa de calentamiento para mantener la temperatura constante y se agitó con un agitador tipo turbina y en cada experimento se varió la velocidad del mismo y se tomaron muestras de 10 ml cada 2 min durante 10 min, dichas muestras se titularon con NaOH de baja concentración. Los resultados que se obtuvieron para el primer y segundo experimento fueron: área superficial promedio de  $2.333,72 \pm 0,08 \text{ mm}^2$  y  $2.356,92 \pm 0,01 \text{ mm}^2$ , respectivamente, y un coeficiente de transferencia de masa de  $5,7031 \pm 0,0006 \text{ cm/s}$  para el primer caso y  $6,7730 \pm 0,0003 \text{ cm/s}$  para el segundo, notándose que hubo una mayor transferencia de masa para el segundo experimento que fue en el que se utilizó una mayor velocidad de agitación. Finalmente se obtuvo la correlación  $k=1,8711 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Re}^{1,6292} [\text{cm/s}]$ . Del trabajo se concluyó que al aumentar la velocidad del agitador aumenta la transferencia de masa de las pastillas hacia el agua destilada, producto del aumento del coeficiente de transferencia de masa con el aumento del número de Reynolds.”

**2.2.- Introducción.** Se incluye el objetivo de la experiencia y se introduce el tema que se tratará, comentando brevemente sus fundamentos, aplicabilidad industrial, etc.

**2.3.- Fundamentos Teóricos.** Se exponen las bases fundamentales para estudiar y comprender la experiencia en cuestión. Las ecuaciones no se deducen, pero hay que especificar claramente la referencia, los nombres y unidades de las variables que aparecen en ellas. Por ejemplo, si se tiene el siguiente párrafo:

Si se mide el flujo de calor transmitido en el material, su espesor y la diferencia de temperaturas,

entonces la conductividad térmica puede calcularse a partir de (3) ó (Bird *et al.*, 1976):

$$k = \frac{Q \Delta X}{A (T_1 - T_2)} \quad (1)$$

donde:

Q : flujo de calor [W]

A : área a través de la cual se transfiere el calor [m<sup>2</sup>]

$\Delta X$  : espesor del material [m]

T<sub>1</sub> : temperatura en el lado anterior de la placa [°C]

T<sub>2</sub> : temperatura en el lado posterior de la placa [°C]

El (3) ó (Bird *et al.*, 1976) sirve para indicar la fuente bibliográfica de la cual se obtuvo la ecuación. El (1) colocado al lado derecho de la ecuación indica el número que corresponde a cada ecuación y facilita el trabajo posterior en el informe, ya que en cualquier momento es posible referirse a ella utilizando sólo el número asignado.

**2.4.- Descripción del Equipo.** Es la descripción precisa de los aparatos e instrumentos utilizados en la realización de la práctica. Se debe indicar la apreciación y el intervalo de medición, la marca del fabricante y las características específicas de cada uno. Por ejemplo, si en el equipo a utilizar hay un termómetro de mercurio, se debe indicar: termómetro de mercurio con apreciación de  $\pm 0,2$  °C y un intervalo entre -10 °C y 150 °C.

**2.5.- Método Experimental.** En esta sección se indican en forma breve todos los pasos a seguir en la realización de la experiencia. Por ejemplo:

- 1.- Abrir la llave de paso del agua.
- 2.- Encender la bomba con el interruptor número 3 del tablero principal.

En esta parte se debe cuidar que todos los puntos estén en el mismo tiempo verbal (infinitivo o tercera persona).

**2.6.- Datos Experimentales.** Aquí se incluyen, en forma tabulada, los valores obtenidos en las mediciones de la experiencia. Cada tabla del informe debe ir centrada en la hoja y llevar su número y nombre en la parte superior. Se debe incluir el error correspondiente a cada medición.

**2.7.- Resultados Experimentales.** En esta sección se dan los resultados finales, en forma tabulada y/o

gráfica, incluyendo la incertidumbre en el resultado y el porcentaje de desviación con respecto al valor teórico. No se incluyen los cálculos ya que éstos van en los apéndices.

En las dos secciones anteriores se debe hacer una breve introducción de los datos y resultados contenidos en las tablas.

**2.8.- Discusión de Resultados.** Aquí se comentan los resultados obtenidos, las diferentes fuentes de error y el porqué de la magnitud de ellos. Además, se debe exponer la razón de la divergencia entre los resultados experimentales y los valores teóricos reportados en la literatura y cualquier otra observación interesante que se haya observado en el desarrollo de las experiencias.

**2.9.- Conclusiones.** Son la consecuencia de la discusión de resultados, y sirven como cierre del trabajo, por lo tanto deben ser redactadas en forma concisa y no deben incluir datos, ni resultados, ni puntos que no fueron discutidos anteriormente de forma explícita.

**2.10.- Recomendaciones.** Se dan las sugerencias para posibles mejoras en la realización de la práctica: mejoras de los equipos, cambios en las técnicas de trabajo, etc.

**2.11.- Referencias.** Incluye todas las referencias o fuentes consultadas por los estudiantes para apoyarse en la elaboración de su informe, siempre que exista en el texto una llamada de las mismas. Se admiten dos posibles sistemas de anotación.

(m.1.) Cita en el texto por apellido de los autores y año de aparición, por ejemplo:

(Modell y Reid, 1974) Cuando son 2 autores

(Bird *et al.*, 1976) cuando son más de 3 autores

La lista de referencias se hace en este caso por orden alfabético. La frase *et al.* (que significa “y colaboradores”) se utiliza cuando el número de autores es superior a dos. Diferentes obras de un mismo autor o grupo de autores se listan en orden cronológico, si hay más de una para un mismo año se distinguen, por ejemplo como: 1975 a, 1975 b, etc.

(m.2.) Llamada en el texto por un número entre paréntesis, asignado en estricta secuencia de cita. La lista de referencias se hace en este caso por orden numérico.

Las referencias deben detallarse de forma que otra persona pueda localizarlas fácilmente. Deben incluirse los apellidos e iniciales de los nombres de todos los autores. Para los libros debe indicarse el título, número de la edición, editorial, lugar (en castellano), año de la publicación y página(s) consultada(s), por ejemplo:

(1) Welty, J. R., R. E. Wilson y E. C. Wicks , "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", 3<sup>ra</sup> edición, Wiley International Edition, John Wiley & Sons, Nueva York, 1960, p. 84.

Para artículos en publicaciones periódicas debe indicarse, además de los apellidos e iniciales de los nombres de todos los autores, el título, nombre de la revista (en la abreviatura estándar), volumen (en negrita o subrayado), número (entre paréntesis), páginas que abarca y año de la publicación, por ejemplo:

(2) Fredenslund, A., R. L. Jones y J. M. Prausnitz, "Group contribution estimation of activity coefficients in non ideal liquid mixtures", *AIChE J.*, **21** (6), 1086-1099 (1975).

**2.12.- Bibliografía.** Es una lista en orden alfabético de todos aquellos libros o revistas (no citados en el informe) que se han consultado para informarse sobre el tema.

**2.13.- Apéndices.** Se citan en orden de aparición y deben ir numerados en orden alfabético. Incluye una explicación detallada del procedimiento a seguir para obtener los resultados, es decir a partir de las ecuaciones mencionadas en los fundamentos teóricos se despejan las variables a calcular y en el caso que se necesiten propiedades de algún material se dice a qué temperatura se van a evaluar. Además se debe explicar el procedimiento que se va a emplear para calcular la incertidumbre en el resultado y el porcentaje de desviación con respecto a los valores teóricos.

Para realizar el análisis de incertidumbre en el resultado se va a emplear el método propuesto por Kline y McClintock (1), el que expresa que si para un conjunto dado de mediciones se conoce la incertidumbre de cada una se puede estimar la incertidumbre del resultado calculado.

(1) Holman J. P., "*Experimental Methods of Engineers*", 2<sup>da</sup> edición, McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1971.

Si el resultado T es función de n variables independientes, es decir:

$$T = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

la incertidumbre del resultado,  $\Delta T$ , será:

$$\Delta T = \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial X_1} \Delta X_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial X_2} \Delta X_2 \right)^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (3)$$

donde,  $\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_n$  son las incertidumbres con que se miden experimentalmente las variables independientes  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Es decir que pueden tomarse como la apreciación de las escalas de los instrumentos utilizados.

En este caso del cálculo del calor se tiene:

$$Q = V \cdot I \quad (4)$$

$$Q = \left[ \left( \frac{\partial Q}{\partial V} \Delta V \right)^2 + \left( \frac{\partial Q}{\partial I} \Delta I \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

donde:

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = I = \frac{Q}{V} \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial I} = V = \frac{Q}{I} \quad (7)$$

Reemplazando en (5):

$$Q = \left[ \left( \frac{Q}{V} \Delta V \right)^2 + \left( \frac{Q}{I} \Delta I \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

Finalmente se obtiene:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \left[ \left( \frac{\Delta V}{V} \right)^2 + \left( \frac{\Delta I}{I} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

La ecuación (8) representa el error absoluto y la ecuación (9) el error relativo del calor calculado. Por ejemplo si se mide un voltaje de 10 V con un voltímetro con precisión en su escala de  $\pm 2$  V ( $\square V = \pm 2$  V) y una intensidad de corriente de 2 A con precisión de  $\pm 0,05$  A ( $\square I = \pm 0,05$  A) los errores serán:

$$\text{Error Absoluto: } \Delta Q = \pm 4 \text{ W}$$

$$\text{Error Relativo: } \Delta Q/Q = \pm 0,2$$

Como puede observarse, la magnitud del error de una variable puede ser función de las variables experimentales. Para un conjunto de mediciones se calcula el error de la variable para cada una de las

experiencias y se toma el mayor de los valores calculados en el caso de que los valores del error no sean constantes.

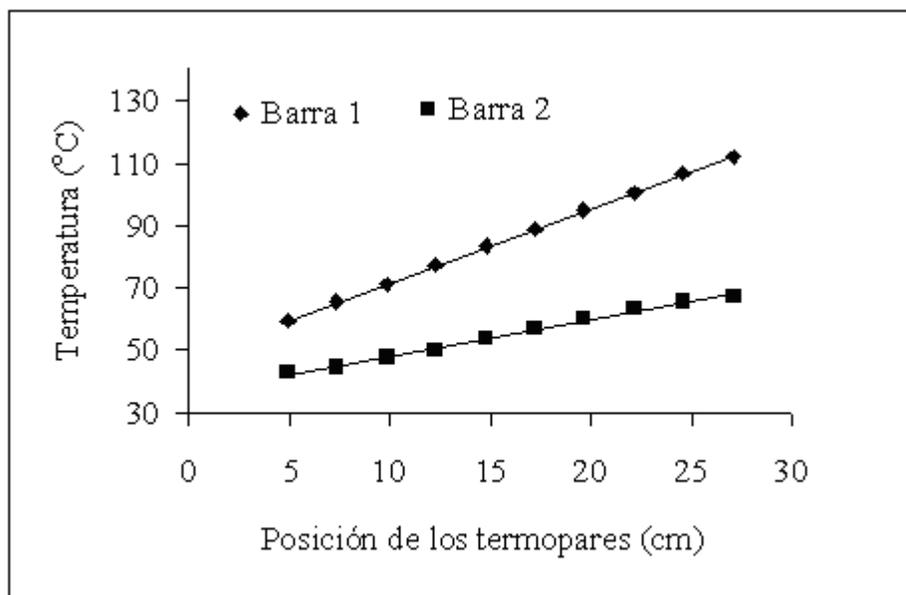
También se incluye un ejemplo numérico de los cálculos realizados para obtener los resultados requeridos, en caso de un cálculo repetitivo sólo se muestra uno. Se pueden agregar resultados de hojas de cálculo o de plataforma de cálculo matemático como MATHCAD, MATLAB, etc.

A continuación se aclaran algunos puntos a objeto de completar la descripción de la buena elaboración de un informe técnico:

**3.- Gráficos.** Si entre los objetivos de la práctica está el de realizar un gráfico, esto se considera un resultado experimental y por lo tanto, va en la sección de resultados. Si el gráfico se usa para obtener un dato o un resultado entonces se coloca en el apéndice.

A los gráficos se les debe colocar un nombre representativo, además, los símbolos y unidades de las variables representadas en cada eje. El nombre debe ir debajo del gráfico y debe llevar un número que lo identifique.

En el caso de una familia de curvas, se distinguen usando puntos diferentes (triángulos, cuadrados, etc.) o trazándolas con líneas también diferentes (continuas, punteadas, etc.), pero todo de un solo color (negro). En estas circunstancias se incluye en el gráfico una leyenda que explique la simbología utilizada. Los valores experimentales se colocan como puntos y no como líneas continuas, estas últimas se reservan para relaciones teóricas.



**Figura 1.** Variación de la temperatura en función de la posición de los termopares.

Los puntos usados en los gráficos deberían indicar la apreciación del instrumento con que se realizó la lectura y el error cometido en el cálculo de la variable dependiente, por ejemplo: si la apreciación de un rotámetro es de  $\pm 0,2$  L/min y en el cálculo del flujo volumétrico para la calibración se comete un error de  $\pm 0,15$  L/min, el punto debe ser un rectángulo cuyo centro esté en el par (x,y) que se tiene, de base igual a dos veces 0,2 L/min y altura dos veces 0,15 L/min.

La escala de cada eje debe hacerse de tal forma que entre cada división haya un espacio conveniente para una buena visualización de la lectura.

**4.- Tablas.** Las tablas deben ir centradas en la hoja y llevar un número y nombre que las identifique. También se deben especificar las unidades de las diferentes variables tabuladas, así como la apreciación de la medida. Por ejemplo:

**Tabla 1.-** Temperatura en la barra cilíndrica para diferentes flujos de calor

Flujo de calor ( $Q \pm 25$ ) W	Temperatura ( $T \pm 1$ ) °C				
	$T_{x_1}$	$T_{x_2}$	$T_{x_3}$	$T_{x_4}$	$T_{x_5}$
100	60	55	51	45	39
200	90	92	70	69	50
300	110	95	78	65	49

**5.- Presentación.** La presentación debe ser tal que el trabajo se vea bien distribuido y bien hecho.

**6.- Extensión.** En lo posible, el informe debe ser breve, eliminando todo aquello que sólo tienda a aumentarlo sin necesidad. Lo importante es la claridad en la exposición, la objetividad y la creatividad. Por último, se debe recordar que el informe se escribe no para el que lo hace sino para el lector en general.

**7.- Evaluación.** El laboratorio consta de cuatro (4) a cinco (5) prácticas, evaluadas de la siguiente forma:

- ✓ **Apreciación (10 puntos):** se tomará en cuenta el cumplimiento de las normas de laboratorio, la puntualidad y la entrega a tiempo de las evaluaciones.
- ✓ **Pre-Laboratorio (10 puntos):** una semana antes de cada práctica se le entregará al grupo de trabajo una asignación relacionada con el tema de la práctica, la cual deberán entregar al llegar

al laboratorio; y será la condición para que realicen la práctica.

- ✓ **Quiz (30 puntos):** se realizarán preguntas relacionadas con la práctica, en las cuales el estudiante deberá hacer un análisis cualitativo de la experiencia de laboratorio; como reconocer el fenómeno de transferencia de calor presente. Este quiz será a libro abierto y grupal.
- ✓ **Interrogatorio (10 puntos):** en el interrogatorio se hará la defensa del pre-laboratorio y se harán preguntas relacionadas con los cálculos, posibles resultados. Esto con el objeto de ayudar al estudiante a esclarecer la metodología de cálculo y estructurar el análisis de resultados.
- ✓ **Informe (40 puntos):** a continuación se especifica las secciones, que debe contener el informe, y el puntaje de cada una de ellas

Sumario	5
Introducción	2
Fundamentos Teóricos	2
Descripción del Equipo	1
Método Experimental	2
Datos Experimentales	0
Resultados	2
Discusión de Resultados	15
Conclusiones y Recomendaciones	7
Referencias	0
Apéndices	4

## PRÁCTICA 1C: PERFILES DE TEMPERATURA

### A.- Objetivos

- Estudiar los perfiles de temperatura en barras sólidas calentadas en un extremo, tanto en estado transitorio como en estado estacionario.
- Determinar la conductividad térmica del acero conociendo la del aluminio.
- Determinar los coeficientes de transferencia de calor por convección para cada una de las barras en estudio utilizando modelos de aletas y correlaciones para convección libre.

### B.- Fundamentos Teóricos

La distribución de temperatura en un sistema se puede predecir por ser una función del mecanismo de transferencia de calor y de la geometría del mismo.

Considerando que el sistema es una barra sólida de área transversal constante, calentada en un extremo, que se encuentra en condiciones estacionarias (Fig. 1C.1), se puede establecer la ecuación diferencial que gobierna la distribución de temperaturas, haciendo un balance de energía en el volumen de control mostrado en la Fig. 1C.2, se obtiene:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

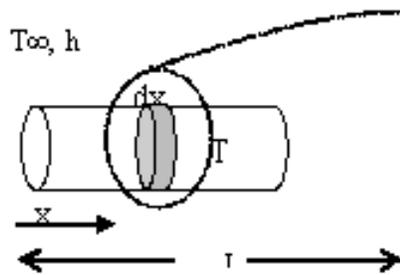


Fig.1C.1. Barra de área de sección constante.

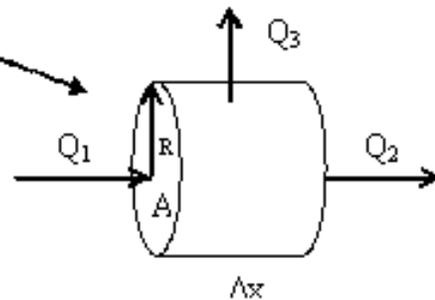


Fig.1C.2. Volumen de control.

$Q_2$  se puede aproximar por series de Taylor a:

$$Q_2 = Q_1 + \frac{dQ_1}{dx} \Delta x \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1):

$$Q_1 = Q_1 + \frac{dQ_1}{dx} \Delta x + Q_3 \quad (3)$$

Simplificando la ecuación (3):

$$\frac{dQ_1}{dx} \Delta x + Q_3 = 0 \quad (4)$$

Se sabe que la transferencia de calor a través de sólidos se realiza mediante el mecanismo de conducción. Así  $Q_1$  se puede expresar por la Ley de Fourier, como:

$$Q_1 = -k.A.\frac{dT}{dx} \quad (5)$$

donde:

k: conductividad térmica [W/m.K].

A: área transversal [m<sup>2</sup>].

El calor,  $Q_3$ , que aparece en la ecuación (4) es el calor cedido por convección, suponiendo que la barra está más caliente que el ambiente se tiene que:

$$Q_3 = h.A'.(T - T_\infty) \quad (6)$$

donde:

h : coeficiente convectivo de transferencia de calor [W/m<sup>2</sup>.K].

A' : área superficial [m<sup>2</sup>].

T<sub>∞</sub>: temperatura del fluido [K].

Sustituyendo (5) y (6) en (4) se tiene:

$$\frac{d}{dx} \left[ -kA \frac{dT}{dx} \right] \Delta x + hA'(T - T_\infty) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{d}{dx} \left[ -kA \frac{dT}{dx} \right] \Delta x + hP\Delta x(T - T_\infty) = 0 \quad (8)$$

donde P es el perímetro  $2\pi R$ .

Reagrupando y simplificando la ecuación (8):

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hP}{kA}(T - T_\infty) = 0 \quad (9)$$

A partir de la ecuación (6) se han hecho algunas suposiciones que no se han mencionado.

La ecuación (9) se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - m^2(T - T_\infty) = 0 \quad (10)$$

donde:

$$m^2 = h \cdot P / k \cdot A$$

Si se define:

$$\theta = T - T_\infty \quad (11)$$

Sustituyendo esta variable en la ecuación diferencial (10) se obtiene:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2 \cdot \theta = 0 \quad (12)$$

La solución general de la ecuación (12) es del tipo:

$$\theta(x) = Ae^{mx} + Be^{-mx} \quad (13)$$

Son necesarias dos condiciones de borde para conocer las constantes A y B de la ecuación (13). Para determinar estas condiciones de borde se deben estudiar los siguientes modelos: barras infinitas, barras finitas aisladas en un extremo y barras finitas con convección en el extremo.

### **Barras infinitas**

En una barra suficientemente larga se puede suponer que la temperatura en el extremo es aproximadamente igual a la temperatura  $T_\infty$ , además se considera que se conoce la temperatura  $T_0$  de la base. Las condiciones de borde serían:

$$\begin{aligned} \theta &= T_0 - T_\infty = \theta_0 && \text{en } x = 0 \\ \theta(x) &= 0 && \text{cuando } x \rightarrow \infty \end{aligned}$$

### **Barras finitas aisladas en el extremo**

Cuando las barras tienen diámetros pequeños en comparación con la longitud de las mismas, el calor transferido por el extremo de la barra es despreciable con respecto al transferido por la superficie. Las condiciones de borde serían:

$$\theta = T_0 - T_\infty = \theta_0 \quad \text{en } x = 0$$

$$\frac{d\theta(x)}{dx} = 0 \quad \text{en } x = L$$

### **Barras con convección en el extremo**

Cuando por el extremo de la barra se transfiere calor por convección al ambiente, las condiciones de borde son las siguientes:

$$\theta = T_o - T_\infty = \theta_o \quad \text{en } x = 0$$

$$k \frac{d\theta(x)}{dx} + h\theta(x) = 0 \quad \text{en } x = L$$

En el modelo de barras finitas aisladas en el extremo se puede introducir una mejora con respecto a la longitud que se utiliza en la expresión de  $\theta(x)$ . Para compensar el error cometido al no evaluar el calor liberado por el extremo de la barra, se utiliza en lugar de la longitud real de la barra,  $L$ , una longitud equivalente,  $L_e$ , que considera el área transversal y el perímetro.

Una vez conocidas las expresiones de  $\theta(x)$  para cada modelo es sencillo determinar el flujo de calor en la superficie y en la base de la barra.

### **C.- Descripción del equipo**

El equipo está constituido por (Fig. 1C.3):

- Una cámara de vapor cilíndrica con un manómetro y drenaje de condensado.
- Tres barras metálicas sólidas, dos de aluminio ( $D=1''$  y  $D=1/2''$ ) y una de acero ( $D=1''$ ), con uno de sus extremos empotrados en la cámara de vapor. La conductividad térmica del aluminio es de 132 BTU/h.ft.°F.
- Tres selectores de posición de termopares localizados en la otra punta de la barra y un selector de termopares que miden la temperatura ambiente.
- El aparato está montado sobre una plancha de fibra de vidrio y recubierto de una estructura de *plexiglas*.

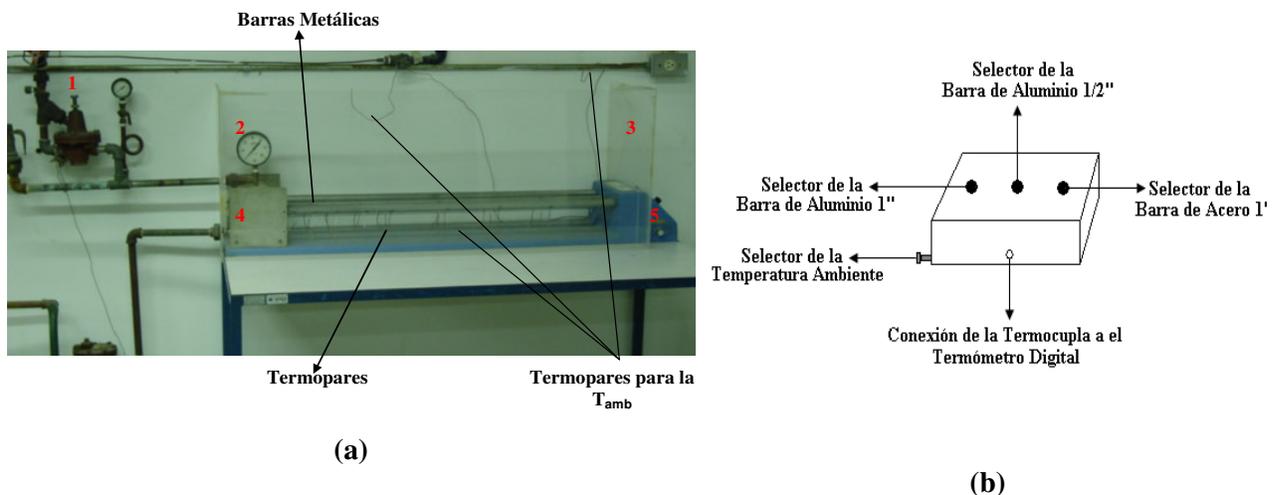
Cada barra tiene diez (10) termopares de tipo cobre-constantán, los cuales están colocados en el centro de las mismas y distribuidos no uniformemente, como se describe a continuación:

**Tabla 1C.1.** Posiciones de las termocuplas.

Termocupla No.	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Distancia entre los termopares (ft)*	0	0,1	0,3	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0

\* Referido a la termocupla 10.

Observe el equipo anexo y trate de identificar cada uno de los elementos que se ha mencionado anteriormente.



**Figura 1C.3.** (a) Diagrama del equipo, (b) Diagrama de la consola

Los elementos numerados son los siguientes: 1) Válvula inglesa (abre al hundirla), 2)Manómetro, 3) Estructura de Plexiglás, 4)Cámara de vapor, 5)Consola.

**D.- Metodología**

1. Abra la válvula inglesa hasta que en el manómetro se registre una presión de 20psi.
2. En la consola se encuentran cuatro selectores (Ver Figura 1C3b). Elija con que barra comenzará a trabajar.
3. Registre las temperatura ambiente con los tres termopares dispuestos para esto (Ver Figura 1C3a) al comienzo de cada ciclo
4. Conecte el Termómetro Digital a la consola
5. Empiece el Ciclo 1:

Cada ciclo incluye en registro de las 10 temperaturas de las 3 barras

Cuando abra una señal eléctrica (un selector) verifique que las demás estén cerradas, porque los termopares envían señales eléctricas a la consola, las cuales son traducidas por el termómetro

digital. Si hay mas de un selector abierto, se cruzan las señales eléctricas y el instrumento de medición traduce otro valor de la temperatura

La estructura del ciclo es la siguiente:

$t_{\text{inicial}}$ (s)	$t_{\text{final}}$ (s)
0	90

Barra/Termopar ( $T \pm 0.1^\circ\text{C}$ )	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Acero 1"	32,6	34,7	32,9	33,4	35,1	37,2	41,3	47,8	59,3	68,5
Aluminio 1/2"	34,2	34,4	35,6	38,0	42,7	46,9	52,6	59,3	68,4	75,0
Aluminio 1"	39,1	40,1	42,7	47,3	54,7	60,2	66,6	73,4	82,4	87,2

Repetir los ciclos 10 veces: Los 5 primeros espaciados a 5 min, los 3 siguientes a 10min y los 2 últimos a 15min

6. Los nueve primeros ciclos corresponden al estado transitorio, y el décimo corresponde al estado estacionario. Es con este último ciclo que realizarán los cálculos.
7. La cámara de vapor contiene vapor saturado

### E.- Cálculos

- a.- Graficar el perfil de temperaturas en función de la posición para cada barra según las sugerencias dadas por el profesor.
- b.- Determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) por dos métodos diferentes: modelo de aletas y por correlaciones de convección libre.
- c.- Calcular la conductividad térmica ( $k$ ) del acero conociendo la del aluminio.

### F.- Cuestionario

1. ¿Qué suposición se está haciendo al colocar la expresión del gradiente en la ecuación (5) en una sola dirección?
2. ¿Cuáles son las suposiciones hechas a partir de la ecuación (6)?
3. Con las condiciones de borde del modelo de barras infinitas evalúe las constantes A y B de la ecuación (13) y escriba la solución general en la forma más simplificada posible.
4. Construya el perfil de temperatura que espera obtener si aplica este modelo.
5. Con las condiciones de borde del modelo de barras finitas aisladas en el extremo evalúe las constantes A y B de la ecuación (13) y escriba la solución general en la forma más simplificada posible.

6. Construya el perfil de temperatura que espera obtener en este caso.
7. ¿Qué significa la segunda condición de borde del modelo de barras con convección en el extremo?
8. Con las condiciones de borde del modelo de barras con convección en el extremo evalúe las constantes A y B de la ecuación (13) y escriba la solución general en la forma más simplificada posible.
9. Construya el perfil de temperatura que espera obtener si aplica el modelo de barras con convección en el extremo.
10. Escriba la expresión de la longitud equivalente para el modelo de barras finitas aisladas en el extremo.
11. ¿Cómo puede determinar el flujo de calor en la base de la barra?
12. ¿Cómo puede determinar el flujo de calor a través de la superficie de la barra?
13. Para el modelo de la barra finita aislada en el extremo, ¿cómo deberían ser esos flujos de calor? ¿Por qué?
14. ¿Cuál es la función de la estructura de *plexiglas* del equipo?
15. ¿Por qué cree Ud. que el equipo tiene tres barras: dos de igual diámetro pero diferente material y otra de un mismo material pero de diferente diámetro?
16. ¿Cuál es la condición indispensable que deben cumplir las barras antes de tomar cualquier medida definitiva? ¿Por qué?
17. ¿Cómo verificaría esta condición? ¿Qué variable constataría frecuentemente?
18. ¿Cómo va a escoger el modelo que se ajusta a cada barra una vez obtenidos los perfiles de temperatura?
19. ¿Cómo haría Ud. para determinar la conductividad térmica del acero conociendo la del aluminio? Anote todas las ecuaciones, pasos intermedios, suposiciones y datos que necesite.
20. ¿De cuántas formas podría calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección (h)? Explique detalladamente cada una.

#### F.- Bibliografía

- 1.- Bird, R. B., W. E. Stewart y E. N. Lightfoot, "Fenómenos de Transporte", Editorial Reverté S.A., Barcelona, 1975.
- 2.- Incropera F. y D. De Witt, "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons Inc., Nueva York, 1985.
- 3.- Kern, D. Q., "Process Heat Transfer", 1<sup>ra</sup> edición, International Student Edition, McGraw-Hil Book Company, Nueva York, 1950.

- 4.- Kreith, F., "Principios de Transferencia de Calor", 1<sup>ra</sup> edición, Editorial Herrero Hermanos Sucesores S. A., México, 1970.
- 5.- Kreith, F. y W. Z. Black, "Basic Heat Transfer", Harper & Row Publishers, Nueva York, 1980.
- 6.- Ozisik, M. N., "Transferencia de Calor", 1<sup>ra</sup> edición, McGraw-Hill Latinoamericana S. A., Bogotá, 1979.
- 7.- Welty, J. R., R. E. Wilson y C. E. Wicks, "Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa", 1<sup>ra</sup> edición, Editorial Limusa S. A., México, 1984.

## PRÁCTICA 2C: CONDUCCIÓN NO ESTACIONARIA

### A.- Objetivos

- Determinar la conductividad térmica y el coeficiente convectivo de transferencia de calor de una muestra de material desconocido.
- Determinar la conductividad térmica y el coeficiente convectivo de transferencia de calor para muestras de diferentes geometrías.

### B.- Fundamentos Teóricos

Se habla de conducción no estacionaria en un cuerpo sólido cuando la temperatura del mismo varía con respecto al tiempo.

La conducción no estacionaria en un sólido isotrópico y homogéneo está representada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \nabla^2 T \quad (1)$$

Para resolver la ec. (1) se necesitan condiciones de borde y condiciones iniciales, como la temperatura del medio que rodea al sólido en estudio, la temperatura en el centro del cuerpo y su temperatura inicial.

La solución de la ecuación (1) en coordenadas rectangulares es:

$$\left( \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\xi_n^2 \cdot Fo) \cdot \cos(\xi_n x^*) \quad (2)$$

donde:

$x^*$ : relación  $x/L$ , donde  $L$  es la mitad del espesor de la placa

$\xi_n$ : raíces positivas de la ecuación trascendente:

$$\xi_n \cdot \tan \xi_n = Bi \quad (3)$$

$$C_n = \frac{4 \cdot \text{sen} \xi_n}{2 \cdot \xi_n + \text{sen}(2 \cdot \xi_n)} \quad (4)$$

La solución de la ecuación (1) en coordenadas cilíndricas es:

$$\left( \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \exp(-\xi_n^2 \cdot Fo) \cdot Jo(\xi_n \cdot r^*) \quad (5)$$

donde:

$\xi_n$ : raíces positivas de la ecuación trascendente:

$$\xi_n \cdot \frac{J_1(\xi_n)}{J_0(\xi_n)} = Bi \quad (6)$$

$$C_n = \frac{2}{\xi_n} \cdot \frac{J_1(\xi_n)}{J_0^2(\xi_n) + J_1^2(\xi_n)} \quad (7)$$

### C.- Descripción del Equipo

El equipo (Fig. 2C.1) consta de:

- Un baño termostático con un agitador, donde se sumergen las muestras de diferentes materiales y geometrías, marca Masterline Forma Scientific, modelo 2095 Bath & Circulator.
- Un cilindro de polivinilcloruro (PVC) de color gris, con las siguientes propiedades:

$$\rho = 1,3743 \text{ g/cm}^3 \quad C_p = 0,934 \text{ kJ/kg K}$$

- Un cilindro y un cubo de material desconocido de color blanco, con las siguientes propiedades:

$$\rho = 0,942 \text{ g/cm}^3 \quad C_p = 1,918 \text{ kJ/kg K}$$

Cada muestra posee un termopar tipo cobre-constantán colocado en el centro de la misma.

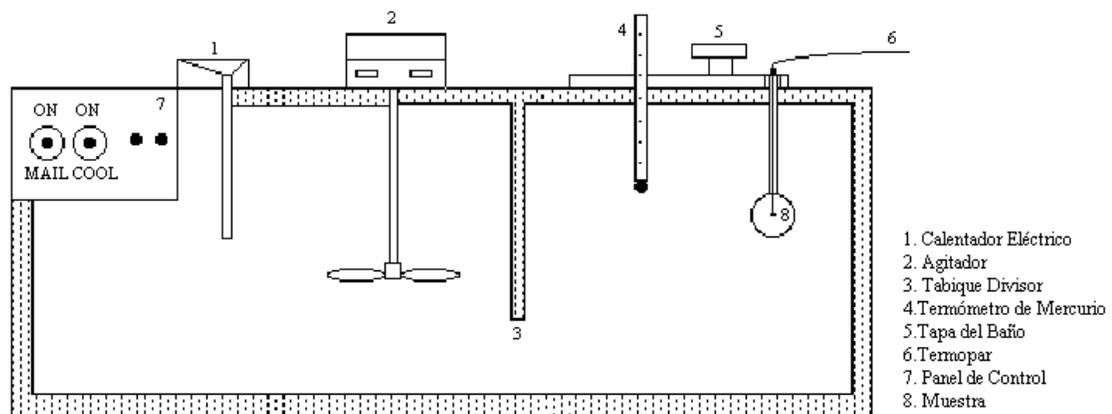
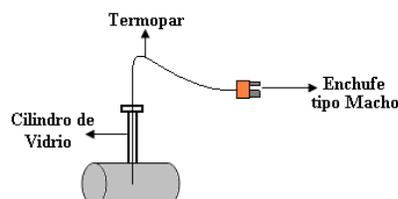


Figura 2C.1. Diagrama del equipo

### D.- Metodología

- Encienda el equipo 30min antes para que este alcance una temperatura estable, regulada por el controlador de Temperatura.
- Encienda el agitador para garantizar que todo el fluido se encuentra a la misma temperatura
- Conectar una de las piezas al Termómetro Digital, a través de un enchufe tipo macho



4. El termopar registra la temperatura del centro geométrico de la pieza
5. Sumerja la pieza en el baño termostático, sin que esta se hunda, sosteniéndola a en la abertura de la tapa del baño, para evitar que entre agua al cilindro de vidrio que recubre al termopar.
6. Registre cada variación de  $1^{\circ}\text{C}$  y el tiempo transcurrido para que se produjese dicho cambio.
7. Culmine la experimentación cuando la pieza haya alcanzado el 90% de la temperatura del baño.
8. Repita el procedimiento para la otra pieza.

### E- Cálculos

- a.- Determinar la conductividad térmica ( $k$ ) y el coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $h$ ) de dos muestras de geometría y material conocidos.
- b.- Determinar la conductividad térmica ( $k$ ) y el coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $h$ ) de una muestra de material desconocido.

### E- Cuestionario

- 1) La solución (2) está en función de dos números adimensionales como lo son el de Biot y el de Fourier. Escriba las expresiones de cada uno y explique su significado físico.
- 2) ¿Qué suposición fue hecha para obtener la solución (2)?
- 3) ¿Qué suposición fue hecha para obtener la solución (4)?
- 4) Es posible expresar un problema no estacionario de  $n$  dimensiones como el producto de  $n$  problemas no estacionarios de una dimensión. ¿Cómo haría para obtener la solución para un cilindro de radio  $k$  y longitud  $L$ ? (Suponga que  $\rho=0$ ).
- 5) ¿Y para un cubo de arista  $r$ ? (Suponga que  $\rho=0$ ).
- 6) ¿Para qué se necesita el agitador?
- 7) ¿Qué requisitos debe cumplir el baño y las piezas antes de comenzar el experimento?
- 8) Si graficara la temperatura en el centro de los sólidos contra el tiempo. ¿Cómo esperaría que fueran los perfiles? ¿Cuál geometría llegará más rápidamente al estado estacionario?
- 9) ¿Por qué no se usa una sola geometría? ¿Qué se pretende al trabajar con geometrías diferentes?
- 10) ¿Qué sucedería si el constructor de la pieza no hubiera colocado al termopar en el centro de la misma?
- 11) Si el constructor le dice exactamente dónde ubicó el termopar, ¿qué podría hacer Ud. para realizar los cálculos?
- 12) Sabiendo la definición del número de Biot, del número de Fourier y la de alfa ( $\alpha$ ), ¿cómo haría Ud. para calcular la conductividad del PVC y el coeficiente de transferencia de calor por

convección? Explique el procedimiento de cálculo para cada geometría en particular (cubo, esfera y cilindro).

- 13) ¿Qué propiedades térmicas del PVC necesita conocer para la práctica?
- 14) ¿Cuántos valores de  $k$  y de  $h$  piensa que va a obtener? Explique.
- 15) ¿Sería conveniente utilizar cobre en vez de PVC para fabricar las piezas? Explique.
- 16) ¿Cuándo piensa Ud. que debe terminar de tomar los datos en una pieza dada?

#### **F.- Bibliografía**

- 1.- Bird, R. B., W. E. Stewart y E. N. Lightfoot, "Fenómenos de Transporte", Editorial Reverté S. A., Barcelona, 1975.
- 2.- Kreith F., "Principios de Transferencia de Calor", 1<sup>ra</sup> edición, Editorial Herrero Hermanos Sucesores S. A., México, 1970.
- 3.- Ozisik, M. N., "Transferencia de Calor", 1ra edición, McGraw-Hill, Latinoamericana S.A. Bogotá, 1979.
- 4.- Welty, J. R., "Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería", 1ra edición, Editorial Limusa S. A., México, 1978.
- 5.- López A., Palmisano E., Pimentel J., Fayés D. y González D., "Propiedades térmicas de frutas y hortalizas tropicales", Rev. Esp. Cienc. Tecnol. Aliment, 33 (3), 271-283, 1993.
- 6.- Pimentel J., Fayés D., López A. y González D., "A Non-Steady Method for Determination of Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity of Poorly conductive Solids", Chem. Eng. Comm., **103**, 131-149, 1991.

## PRÁCTICA 4C: DILATACIÓN TÉRMICA

### A. Objetivos

- Analizar el fenómeno de dilatación térmica en tuberías de diferentes materiales y diámetros.
- Determinar el coeficiente de dilatación térmica lineal ( $\alpha$ ) de cada tubería.
- Describir el comportamiento de un compensador de dilatación térmica en una tubería horizontal.
- Determinar la fuerza que se origina debido a la expansión térmica de una tubería de PVC.

### B.- Fundamentos Teóricos

Uno de los cambios más conocidos que ocurren en la mayoría de los metales, y en algunos materiales, es el incremento de su volumen conforme aumenta su temperatura. Este fenómeno es conocido como dilatación térmica, y ocurre como consecuencia del cambio de la separación promedio entre los átomos o moléculas constituyentes del material.

A temperaturas ordinarias, los átomos vibran en torno a sus posiciones de equilibrio a una determinada frecuencia y amplitud; a medida que la temperatura en el sólido aumenta, la energía interna aumenta y los átomos vibran con amplitudes mayores, incrementándose la separación promedio entre ellos, y por ende aumentan las dimensiones del sólido.

En el ámbito de la ingeniería, la expansión térmica es un factor a considerar en el diseño y construcción de sistemas que estén sometidos a cambios de temperatura; por esta razón, los puentes de hormigón, así como también los rieles del ferrocarril, poseen un espacio vacío entre cada tramo del material que conforma la estructura.

Sí la expansión del sólido es lo suficientemente pequeña en comparación con las dimensiones iniciales, entonces el cambio en cualquier dimensión es proporcional al cambio de temperatura, a la longitud inicial y a una constante de proporcionalidad llamada coeficiente de expansión lineal, y viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot (T - T_0) \quad (1)$$

donde:

$\Delta L$ : Variación de longitud [mm].

$\alpha$ : coeficiente de expansión lineal [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ].

$L_0$ : Longitud de la tubería a  $T_0$  [mm].

$T$ : Temperatura del fluido [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$T_0$ : Temperatura inicial [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Como todas las dimensiones lineales de un objeto cambian con la temperatura, se deduce que el área y el volumen también lo hacen. Suponiendo que el volumen de un cuerpo a temperatura inicial viene dado por la siguiente expresión:

$$V_0 = L_0 \cdot h_0 \cdot w_0 \quad (2)$$

donde:

$V_0$ : volumen del cuerpo [ml].

$L_0$ : longitud del cuerpo [mm].

$h_0$ : altura del cuerpo [mm].

$w_0$ : ancho del cuerpo [mm].

Si la temperatura cambia, el volumen del cuerpo también, y cada dimensión cambia de acuerdo a la ecuación (1), por lo tanto queda que:

$$V_0 + \Delta V = L_0 \cdot h_0 \cdot w_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)^3 \quad (3)$$

donde:

$\Delta V$ : Variación de volumen [ml].

$\Delta T$ : Variación de la temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Si se divide ambos lados entre el volumen inicial del sólido, se tiene que el cambio fraccionario en el volumen es:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 3.\alpha.\Delta T + 3.(\alpha.\Delta T)^2 + 3.(\alpha.\Delta T)^3 \quad (4)$$

Despreciando los dos últimos términos de la ecuación nos queda que el cambio de volumen a presión constante de un sólido viene dado por:

$$\Delta V = 3.\alpha.V_0.\Delta T \quad (5)$$

Finalmente tenemos que para un sólido, el coeficiente de expansión volumétrica es aproximadamente tres veces el coeficiente de expansión lineal, por lo tanto el cambio de volumen de un sólido viene dado por la expresión:

$$\Delta V = \beta.V_0.(T - T_0) \quad (6)$$

donde:

$\beta$ : coeficiente de dilatación volumétrica [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ].

En el campo de instalación de tuberías; si las líneas de distribución transportan fluidos calientes o se encuentran en ambientes de alta temperatura; la expansión es un factor a considerar ya que toda tubería sujeta a cambios térmicos sufre contracciones y dilataciones que pueden dañar el sistema al que está conectadas, ya que los movimientos que se producen originan fuerzas en varias direcciones que tensan el sistema, lo cual a largo plazo puede ocasionar rupturas y fugas.

Para medir las fuerzas de expansión ocasionadas por las tuberías se utilizará un dispositivo constituido por dos resortes, el cual creará una fuerza para contrarrestar a aquella producida por el aumento de temperatura. La fuerza de un resorte viene dada por la Ley de Hooke:

$$F = -K.\Delta X \quad (7)$$

donde:

F: Fuerza longitudinal [N].

K: Constante del resorte [N/mm].

$\Delta X$ : Variación de posición [mm].

Los compensadores de dilatación ofrecen una muy buena solución al problema ocasionado por las fuerzas de expansión; ya que son dispositivos que absorben los movimientos causados por este fenómeno térmico, requieren poco espacio para su instalación, no necesitan mantenimiento y tienen mínimas pérdidas de carga y temperatura. También hay maneras más económicas de afrontar el problema, y consisten en instalar secciones de tubería en forma de U, en puntos estratégicos de los sistemas de distribución.

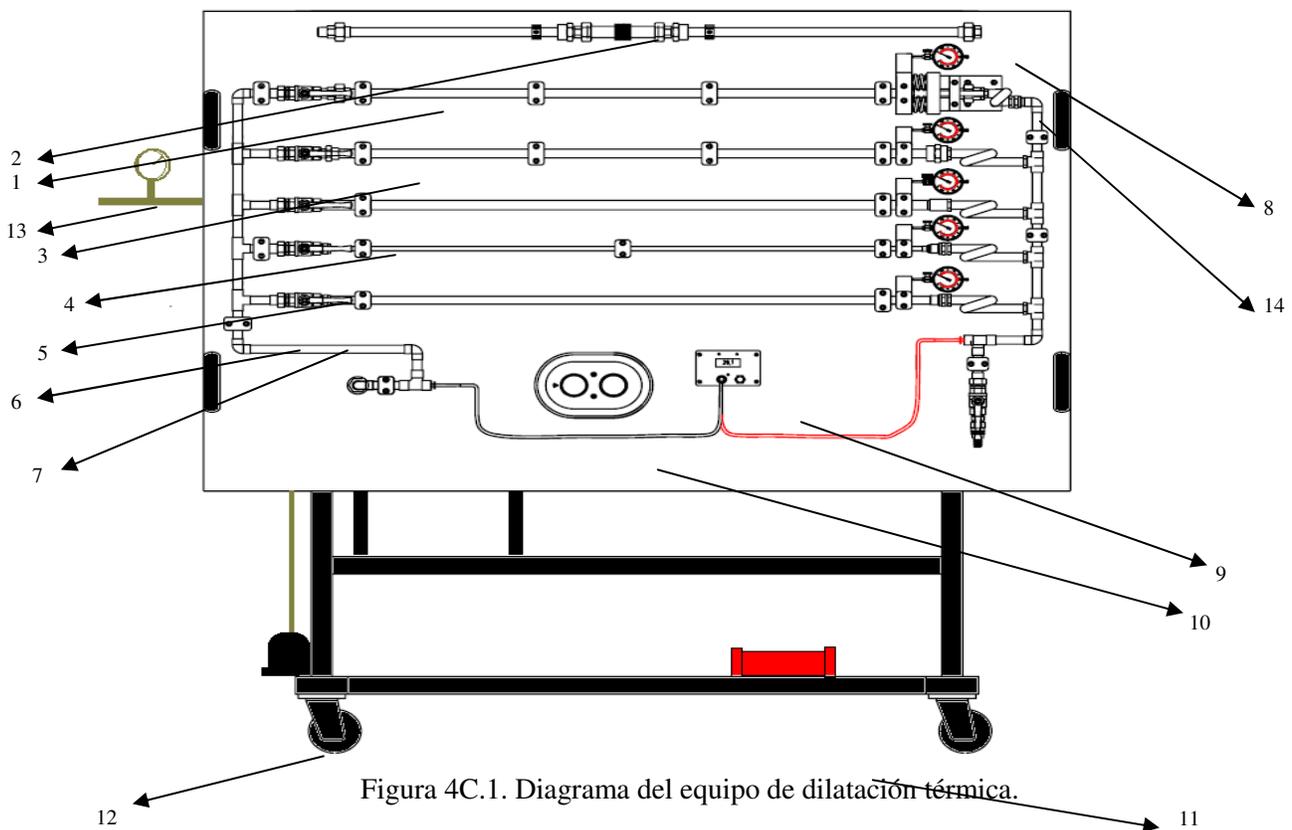
### C.- Descripción del Equipo

El equipo consta de:

-Un tablero de pruebas constituido por los siguientes elementos:

- 5 válvulas de paso para los flujos de entrada de cada línea.
- 5 medidores de dilatación térmica ( $\pm 1$  mm).
- Un medidor de temperatura digital ( $\pm 0,1$  °C).
- Un mezclador termostático.
- Un dispositivo para medir la fuerza de expansión, constituido por dos resortes:  $K_{\text{resorte}} = 78$  N/mm;  $K_{\text{total}} = 156$  N/mm
- Y las siguientes tuberías:
  - Una PVC con DN (Diámetro Nominal) 15 mm, posee una sección de tubería regular que puede ser reemplazada por un compensador de dilatación hecho de acero inoxidable.
  - Una de polietileno (PE) con un DN 15 mm.
  - Una de Acero galvanizado con un diámetro de  $\frac{1}{2}$ ".

- Dos de cobre una con un DN de 15mm y otra de DN 8 mm.
- Una bomba para transportar fluidos caliente (motor eléctrico 1/6 hp).
- Un intercambiador de calor tipo serpentín.
- Un manómetro en la línea de vapor que alimenta al serpentín del intercambiador.
- Una válvula de diafragma para regular la presión del vapor.
- Dos válvulas globo, una para regular la entrada de agua al intercambiador, y otra para la entrada de agua fría al equipo.
- Una llave de paso para el desagüe del tanque.
- A continuación se presenta el diagrama del equipo con los elementos señalados anteriormente:



- |                                     |                              |
|-------------------------------------|------------------------------|
| 1.-Tubería de PVC DN 15mm           | 8.-Medidor de expansión (mm) |
| 2.- Compensador de Acero Inoxidable | 9.- Medidor de Temperatura   |
| 3.- Tubería de PE, DN 15 mm         | 10.- Mezclador termoestático |

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| 4.- Tubería de Acero Galvanizado ½" | 11.- Bomba  |
| 5.- Tubería de cobre, DN 8mm        | 12.- Trampa de Vapor                                  |
| 6.- Tubería de cobre DN 15 mm       | 13.- Manómetro (psi).                                 |
| 7.- Válvula de entrada              | 14.- Dispositivo para medir la $F_{\text{expansión}}$ |

#### **D.- Procedimiento Experimental.**

##### I. Cálculo de Coeficiente de Dilatación

1. Abra el paso del agua al sistema.
2. Llene el tanque negro, que se encuentra detrás del equipo.
3. Fijar la presión del manómetro en 5psi para que circule vapor de agua al serpentín que se encuentra dentro del tanque negro.
4. Esperar a que la temperatura del tanque alcance 65°C.
5. Verificar que el dispositivo para medir la  $F_{\text{expansión}}$  se encuentre suelto. Es decir, no este ejerciendo ninguna fuerza hacia el lado izquierdo
6. Abrir las válvulas de entrada de las tuberías, para dejar circular agua fría durante 5min.
7. Fijar el medidor de expansión en cero.
8. Cerrar todas las válvulas y dejar abierta la válvula de la tubería de PVC.
9. Encender la bomba.
10. Con el mezclador termoestático, fijar un caudal de trabajo (que será constante durante toda la práctica) y una temperatura, para comenzar la experiencia, de 10°C por encima de la temperatura del agua fría ( $T_{\text{cool}}^W$ ). Las otras 3 temperaturas de trabajo estarán espaciadas por 5°C.
11. Una vez fijada la temperatura de  $T_{\text{cool}}^W + 10^\circ\text{C}$  dejar circular esta por la Tubería de PVC.
12. Registrar la temperatura de entrada y de salida.
13. Cuando estas se igualen, anotar la dilatación de la tubería.
14. Abrir la válvula de la Tubería siguiente y cerrar la de la Tubería de PVC.
15. Repetir el procedimiento.
16. Continuar con las demás barras.
17. Cambiar la temperatura de trabajo, y comenzar con el paso 12

**Nota:** estar pendiente que el tanque no descienda bruscamente de nivel, para evitar que se acabe el agua y se deba llenar nuevamente el tanque negro y esperar a que este se caliente

##### II. Cálculo de la fuerza de Dilatación

Cuando se trabaje con la última temperatura en la tubería de PVC se realizará esta experiencia

1. Medir con el vernier la distancia entre las placas que contienen los resortes.
2. Comprimir los resortes del dispositivo estos hasta llevar nuevamente el medidor de expansión a cero.
3. Medir la distancia, resultante, luego de la compresión

### III. Compensador de expansión

1. Apague la bomba
2. Deje circular por la tubería de PVC agua fría durante hasta palpar que la tubería este fría.
3. Fije el regulador de expansión en cero
4. Cierre la válvula
5. CON CUIDADO, retire el tramo de tubería de PVC y coloque el compensador de expansión de acero. Si en medidor de expansión se descalibro, corrija nuevamente
6. Encienda la bomba
7. Con el regulador termostático, fije una temperatura de trabajo que este  $15^{\circ}\text{C}$  por encima de la  $T_{cool}^W$
8. Registrar la expansión de la tubería

### D.- Cálculos

- Graficar el cambio de longitud en la tubería en función de la variación de temperatura.
- Determinar el coeficiente de expansión térmica lineal para cada tubería.
- Comparar las propiedades dilatantes de las tuberías.
- Determinar como influye el diámetro en el fenómeno de dilatación en tuberías del mismo material.
- Calcular la fuerza de expansión que se produce en la tubería de PVC para cada cambio de temperatura.

### E.- Cuestionario

1. Explique qué sucede dentro de un material para que se dé este fenómeno.
2. ¿En que tipos de materiales se cumple que el cambio de longitud en cualquier dimensión, es proporcional al cambio de temperatura, y en cuáles no? Mencione algunos ejemplos.

3. Demuestre que la expansión volumétrica de un cuerpo se puede relacionar con la expansión lineal del mismo.
4. Mencione algunas aplicaciones de la expansión térmica en ingeniería.
5. ¿Por qué cuando se construyen puentes con pavimento de hormigón, se dejan huecos entre tramos?
6. ¿Qué otros efectos produce un aumento de temperatura en las propiedades de los materiales?
7. ¿Qué es un termostato y explique su funcionamiento?
8. ¿Cómo controlaría usted el fenómeno de dilatación térmica en un sistema de tuberías que transporten fluidos calientes?
9. ¿Qué es un compensador de dilatación térmica?
10. ¿Existen otros métodos para controlar la dilatación térmica que ocurre en una línea de servicio de fluidos calientes? ¿Cuáles son y cómo funcionan?
11. Diga cuáles son las temperaturas máximas que pueden soportar cada una de las tuberías que posee el equipo.
12. Si usted fuese ha construir un sistema de distribución de agua caliente para su ducha, que material utilizaría para las tuberías y por qué. Razone su respuesta.
13. ¿Por qué el compensador de dilatación esta colocado en la tubería de PVC?

#### **F.- Bibliografía**

1. Bird, R. B., W. E. Stewart y E. N. Lightfoot, “Fenómenos de Transporte”, Editorial Reverté S. A., Barcelona, 1975.
2. Incropera, F. P. y D. P. DeWitt. “Fundamentos de Transferencia de Calor”, 4ta edición, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., México, 1999.
3. Kern, D. Q. “Process Heat Transfer”, 1ra edición, International Student Edition, McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1950.
4. Serway, Raymond A. “Física. Tomo I”. 4ta edición. Editorial McGraw-Hill S.A. México, 1999.

## PRÁCTICA 6C: INTERCAMBIADOR DE CALOR EN FLUJO CRUZADO

### A.- Objetivos

- Estudiar el perfil de velocidades del aire antes y después del banco de tubos.
- Relacionar el coeficiente convectivo de transferencia de calor con la posición de la barra de cobre dentro del banco de tubos, para diferentes números de Reynolds.

### B.- Fundamentos Teóricos

Un intercambiador de calor es un dispositivo que efectúa la transferencia de calor de un fluido caliente a uno frío. Para lograr esta transferencia, los fluidos pueden mezclarse directamente o estar separados uno del otro por una pared a través de la cual fluye el calor.

Uno de los tipos básicos de intercambiadores de calor es el de flujo cruzado o transversal. Recibe este nombre debido a que las direcciones de los fluidos que transfieren calor son perpendiculares. En la figura 6C.1 se muestra un esquema de un intercambiador de flujo cruzado.

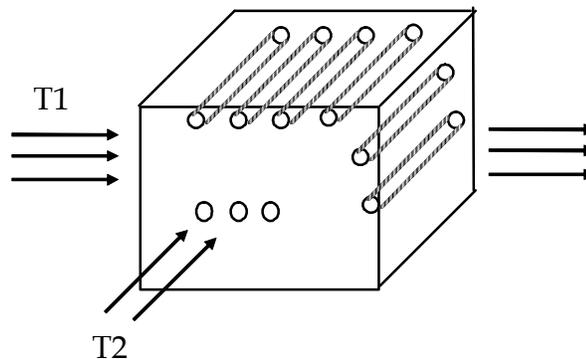


Figura 6C.1. Intercambiador de flujo cruzado (T1 es la temperatura del fluido que entra a la cámara y T2 es la temperatura del fluido que entra por los tubos).

El flujo de aire a través de un radiador caliente es un ejemplo de este tipo de intercambiador, donde el mecanismo de transmisión de calor es por convección natural. No obstante, si las corrientes se ponen en movimiento por acción de algún dispositivo mecánico (bomba, agitador, compresor, etc), el flujo es independiente de los gradientes de velocidad y recibe el nombre de convección forzada.

Dentro de la industria se utiliza frecuentemente este tipo de intercambiador en procesos que requieren precalentar corrientes de fluidos, como por ejemplo el aire que va hacia las unidades

generadoras de vapor, en las cuales se utiliza generalmente gases de escape de procesos de combustión como fuente de calor. Otro ejemplo es la transmisión de calor desde una corriente de gas caliente hacia el agua de enfriamiento y en el enfriamiento de un líquido caliente por aire a temperatura ambiente.

En el laboratorio se puede simular un intercambiador de calor de flujo cruzado utilizando un cilindro de metal macizo y un flujo de aire, tal como se muestra en la figura 6C.2.

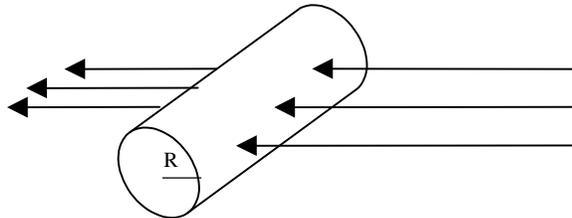


Figura 6C.2. Tubo de metal expuesto a un flujo de aire

Si se considera que el elemento cilíndrico está a una temperatura mayor que la del aire ( $T > T_a$ ), se puede escribir la rapidez de transferencia de calor de la siguiente manera:

$$Q = h \cdot A \cdot (T - T_a) \quad (1)$$

donde:

$h$ : coeficiente convectivo de transferencia de calor [ $W/m^2 \cdot K$ ].

$A$ : área superficial [ $m^2$ ].

En el cilindro, la caída de temperatura  $dT$  en un período de tiempo  $dt$  puede expresarse como:

$$- Q \cdot dt = m \cdot C_p \cdot dT \quad (2)$$

donde:

$Q$ : flujo calórico [ $J/s$ ].

$m$ : masa del cilindro [ $kg$ ].

$C_p$ : capacidad calorífica [ $J/kg \cdot K$ ].

Combinando las ecuaciones (1) y (2) se tiene:

$$- h \cdot A \cdot (T - T_a) \cdot dt = m \cdot C_p \cdot dT \quad (3)$$

Rearreglando la ecuación (3):

$$\frac{-dT}{(T - T_a)} = \frac{h \cdot A}{m \cdot C_p} dt \quad (4)$$

Al integrar la ecuación (4):

$$\ln ( T - T_a ) - \ln ( T_o - T_a ) = - \frac{h.A.t}{m.C_p} \quad (5)$$

El coeficiente de transferencia de calor convectivo es función de la velocidad efectiva ( $v$ ) del aire y de las variables independientes: diámetro del cilindro ( $d$ ), conductividad térmica ( $k$ ) del aire, densidad del aire ( $\rho$ ), calor específico del aire ( $C_p$ ) y viscosidad ( $\mu$ ) del aire.

Haciendo un análisis adimensional se llega a que la relación entre  $h$  y las variables citadas anteriormente es de la forma:

$$\frac{hd}{k} = f \left( \frac{\rho.v.d}{\mu}, \frac{C_p.\mu}{k} \right) \quad (6)$$

En la práctica, el número de Prandtl es prácticamente constante para gases bajo un amplio rango de condiciones.

### C.- Descripción del Equipo

El equipo consta de:

- Un ducto de sección cuadrada de 12,5 cm con una cámara de prueba de paredes transparentes por donde fluye el aire. Las propiedades que se presentan a continuación se encuentran a 300 K (Incropera y DeWitt, 1999).

$$\rho_{\text{aire}} = 1,1614 \text{ kg/m}^3$$

$$k_{\text{aire}} = 26,3 \cdot 10^{-3} \text{ W/m.K}$$

$$C_{p_{\text{aire}}} = 1,007 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C}$$

$$\mu_{\text{aire}} = 184,6 \cdot 10^{-7} \text{ Pa.s}$$

- Un ventilador centrífugo para impulsar el aire a través del ducto (motor eléctrico 1 hp).
- Un banco de tubos con 18 barras de *plexiglas* de 12,5 cm de largo y 1,25 cm de diámetro

separados centro a centro por 2,5 cm, ubicado en la cámara de prueba de paredes transparentes.

- Cilindro de cobre ( $d = 12,48$  mm,  $L = 95,03$  mm y  $m = 107,09$  g) con un termopar tipo cromel-alumel ubicado en su centro.
- Calentador eléctrico (la temperatura máxima promedio alcanzada por el cilindro de cobre en el calentador es de  $80$  °C).
- Un tubo *Pitot* que puede ser colocado antes y después del banco de tubos.
- Un manómetro inclinado conectado al tubo *Pitot*.
- Una placa que permite regular el caudal de aire variando el porcentaje de abertura.
- Panel de control (encendido y apagado del ventilador y del calentador).

Observe el diagrama del equipo (Figura 6C.3) y trate de identificar cada elemento que se ha mencionado anteriormente. Tenga en cuenta que el cilindro de cobre del calentador puede ser colocado en lugar de uno de los de plástico que se encuentra en la cámara de pruebas.

El tubo *Pitot* puede ser ubicado delante o detrás del banco de tubos, ya que tiene la facilidad que puede ser cambiado de posición, al igual que puede ascender o descender en el banco de tubos.

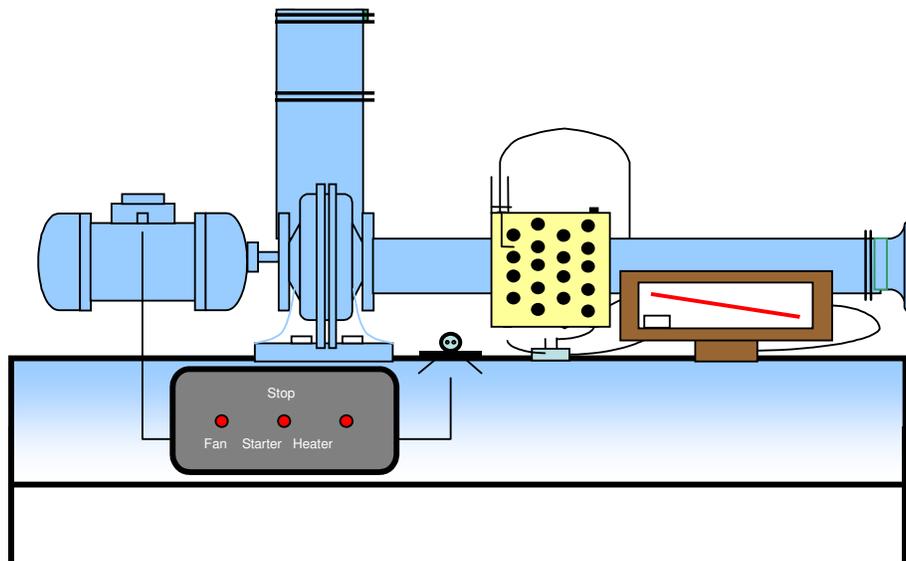


Figura 6C.3. Diagrama del Equipo

Para calcular uno de los números adimensionales  $U_d$ , necesita de la velocidad efectiva del aire a través de los tubos ( $v$ ). Para su cálculo se puede usar la velocidad del aire antes de chocar con el arreglo de tubos ( $v_1$ ).

Para calcular  $v_1$ , se aplica la ecuación de Bernoulli entre el punto donde el aire está en reposo (a la entrada del ducto de metal) y otro en donde se quiere conocer la velocidad (antes del arreglo de tubos).

Realice a continuación ese balance, del cual deben obtener la siguiente expresión para la velocidad antes del arreglo:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad (7)$$

donde:

$\Delta P$ : caída de presión [Pa].

$\rho$ : densidad del fluido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Para poder calcular la velocidad efectiva se plantea la siguiente igualdad:

$$A_1 v_1 = A v \quad (8)$$

donde:

$A_1$  : es el área del ducto perpendicular al flujo de aire [ $\text{m}^2$ ].

$A$  : es el área del ducto menos el área que ocupan los cinco cilindros en un plano perpendicular al flujo de aire, que pasa por los ejes de los cilindros [ $\text{m}^2$ ].

Entonces:

$$v = (A_1 / A) \cdot v_1 \quad (9)$$

## Procedimiento Experimental

### Primera Parte: Perfil de Velocidad antes y después del banco de tubos:

1. Encender el ventilador centrífugo para impulsar el aire a través del ducto, presionando el botón azul ubicado en el panel de control.
2. Regular el caudal variando el porcentaje de abertura de la placa.
3. Ubicar el tubo Pitot delante del banco de tubos, verificando que la válvula correspondiente esté abierta, en este caso la válvula ubicada a la derecha.
4. Registrar la caída de presión en el manómetro.
5. Registrar los valores de caída presión para diferentes alturas en el banco de tubos, para esto existe un mecanismo en el tubo Pitot que permite cambiar la posición de este ya sea

ascendiendo o descendiendo en el banco. Las mediciones se realizan para 12 alturas diferentes de 1 cm cada una.

6. Ubicar el tubo Pitot después del banco de tubos y proceder a registrar las caídas de presión repitiendo los pasos anteriores.
7. Realizar estas mediciones para diferentes caudales especificados por el profesor (60%, 80% y 100%).

**Segunda Parte: Perfil de temperatura a diferentes caudales para la barra de cobre en una posición fija.**

1. Encender el calentador en el panel de control para calentar la barra de cobre hasta una temperatura de 60 C.
2. Fijar el caudal en 60% variando la abertura de la placa.
3. Una vez que la barra alcance la temperatura deseada, retirarla del calentador e introducirla en el banco de tubos en una posición que se mantendrá fija para todos los caudales, en este caso la posición 7.
4. Registrar con un cronometro la variación de temperatura cada 5 segundos hasta que la temperatura alcanzara un valor constante o temperatura ambiente.
5. Proceder a variar el caudal a 80% y luego a 100% considerando que la temperatura inicial de la barra debe ser 60 C antes de comenzar cada experiencia. Seguir los pasos mencionados anteriormente.

**Tercera Parte: Perfil de temperatura a diferentes posiciones de la barra de cobre dentro del banco de tubos para un mismo caudal:**

1. Encender el calentador en el panel de control para calentar la barra de cobre hasta una temperatura de 60 C.
2. Fijar el caudal en 80% variando el porcentaje de abertura de la placa.
3. Retirar la barra de cobre del calentador e introducirla dentro del banco de tubos para las diferentes posiciones.

**D.- Cálculos**

- Graficar los perfiles de temperatura para diferentes posiciones de la barra de cobre a un

caudal determinado.

- Graficar los perfiles de temperatura a varios caudales fijando la posición de la barra de cobre dentro del banco de tubos.
- Graficar los perfiles de velocidad antes y después del banco de tubos.
- Obtener el coeficiente de transferencia de calor para los casos estudiados.
- Obtener una relación del número de Nusselt en función del número de Reynolds.

### E.- Cuestionario

- 1.- Explique qué significan cada uno de los términos de la ecuación (1) y sus unidades. ¿Qué suposiciones se han hecho al escribir la ecuación (1)?
- 2.- Explique qué significan cada una de las variables que aparecen en la ecuación (2) y sus unidades.
- 3.- ¿Qué significa  $T_o$  en la ecuación (5)?
- 4.- ¿Cómo podría determinarse el coeficiente de transferencia de calor  $h$  usando la ecuación (5) y teniendo datos experimentales de temperatura ( $T$ ) en función del tiempo ( $t$ )? ¿Necesitaría de otros datos? En caso afirmativo, ¿Cuáles?
- 5.- ¿Cuáles son los grupos adimensionales que aparecen en la ecuación (6)? Explique el significado físico de cada número adimensional.
- 6.- ¿Qué se debe suponer para considerar que una termocupla localizada en el centro de la barra de cobre podría dar una buena indicación de la temperatura efectiva de la superficie?
- 7.- ¿Cómo vendría dada la ecuación (7) si se considera al aire como gas ideal a temperatura  $T_a$  y presión  $P_a$ ?
- 8.- ¿Qué significado físico tiene la ecuación (8)?
- 9.- Si la altura del ducto es de 12,5 cm y los cinco cilindros tienen un diámetro de 1,25 cm ¿A qué es igual  $A_1/A$ ?
- 10.- Explique las características, tanto antes como después del banco de tubos, del perfil de velocidades del aire. Justifique todas sus afirmaciones. ¿Podría considerarse flujo desarrollado tanto antes como después del banco de tubos? ¿Por qué?
- 11.- Explique de forma comparativa los valores del coeficiente convectivo en cada una de las posiciones del banco de tubos. Mencione tendencias, similitudes y diferencias. Justifique.

### F.- Bibliografía

- 1.- Incropera, F. P. y D. P. DeWitt. "Fundamentos de Transferencia de Calor", 4<sup>ta</sup> edición, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., México, 1999.
- 2.- Kern, D. Q. "Process Heat Transfer", 1<sup>ra</sup> edición, International Student Edition, McGraw-Hill Book

Company, Nueva York, 1950.

3.- Kreith, F. y W. Z. Black, "Basic Heat Transfer", Harper & Row Publishers, Nueva York, 1980.

4.- Ozisik, M. N., "Transferencia de Calor", 1<sup>ra</sup> edición, McGraw-Hill Latinoamericana S. A., Bogotá, 1979.

5.- Welty, J. R., R. E. Wilson y C. E. Wicks, "Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa", 1<sup>ra</sup> edición, Editorial Limusa S. A., México, 1984.

## PRÁCTICA 7C: INTERCAMBIADOR DE DOBLE TUBO / TUBO Y CORAZA.

### A.- Objetivos

- Estudiar el calentamiento o enfriamiento de una corriente a otra cuando están separadas por una pared sólida.
- Determinar el efecto del arreglo de los flujos (cocorriente o contracorriente), sobre:
  - La cantidad el calor transferida
  - El coeficiente global de transferencia de calor (teórico y experimental)
  - La eficiencia (NTU) del intercambiador de calor
  - La eficiencia de intercambio de calor (porcentaje de calor cedido por el flujo caliente, que efectivamente es transferido a la corriente fría)
- Construir y analizar los perfiles de temperatura para las corrientes fría y caliente que circulan por el intercambiador doble tubo.
- Determinar el efecto de las capacitancias térmicas ( $mC_{p_{frío}}$  vs  $mC_{p_{caliente}}$ ) sobre:
  - Las características del perfil de temperatura de los fluidos en el intercambiador.
  - La cantidad de calor transferida
  - El coeficiente global de transferencia de calor (teórico y experimental)
  - La eficiencia (NTU) del intercambiador de calor
  - La eficiencia de intercambio de calor (porcentaje de calor cedido por el flujo caliente, que efectivamente es transferido a la corriente fría).
- Determinar el efecto de la temperatura de entrada del fluido caliente sobre el proceso de intercambio de calor

### B. Fundamentos Teóricos

El intercambiador doble tubo es la forma más simple de intercambiadores de calor y consiste en dos tubos concéntricos (coaxiales) que llevan en su interior fluidos fríos o calientes.

La eficiencia con la cual el equipo permite el intercambio de energía de una corriente a otra puede ser evaluada con parámetros como: la eficiencia global y la eficiencia por temperaturas, las cuales pueden ser comparadas con las magnitudes reales tanto del calor cedido por el fluido caliente, el calor absorbido por el fluido frío y las pérdidas de calor al ambiente.

La eficiencia global o eficiencia de intercambio de calor, corresponde a la relación entre la cantidad de calor recibido por la corriente fría en comparación con la cantidad de calor cedida por la corriente caliente. Esta eficiencia, en cierto modo, es un reflejo de la cantidad de energía intercambiada entre ambas corrientes o desde otro punto de vista entre el equipo y el medio ambiente que le rodea; ya que termodinámicamente se sabe que la energía solo puede ser intercambiada o transformada mas no creada ni destruida. La expresión matemática de la eficiencia global. ( $\eta_G$ ):

$$\eta_G(\%) = \frac{Q_c}{Q_h} \cdot 100 \quad (1)$$

La eficiencia de un intercambiador de calor está definida como la razón entre la transferencia real y la transferencia máxima posible. Esta última se define como la cantidad de calor intercambiada entre las corrientes si estuviesen en un intercambiador de calor de área infinita y operando en contra corriente. Para el cálculo de este calor máximo se utiliza además el menor valor de capacitancia térmica ( $Cp.m$ ) que exista.

De ésta forma la eficiencia se puede escribir como:

$$\eta = \frac{Q_{real}}{Q_{max}} \quad (2)$$

$$\eta_i = \frac{(m.Cp.\Delta T)_i}{(m.Cp)_{\min} \cdot (T_{entrada} - T_{salida})_{caliente}} \quad (3)$$

Donde  $i$ , es **h** para el fluido caliente y **c** para el fluido frío.

Para el equipo:

$$\eta_m = \frac{\eta_h + \eta_c}{2} \quad (4)$$

En los equipos de transferencia de calor el Calor transferido puede ser determinado para cada una de las corrientes (fría o caliente), realizando un balance de energía en cada una de ellas.

$$Q_i = m_i \cdot Cp_i \cdot (\Delta T)_i \quad (5)$$

Donde:

Q: Calor transferido referido al fluido **i** (**h** para el caliente y **c** para el frío)

$m_i$ : Flujo másico del fluido **i**

$Cp_i$ : Capacidad Calorífica del fluido **i** evaluado a la temperatura media

La diferencia entre el calor cedido por la corriente caliente y el absorbido por la corriente fría se considera como el calor intercambiado con el ambiente. Otra forma de evaluar la transferencia de calor en el equipo consiste en realizar un balance global de energía expresado como:

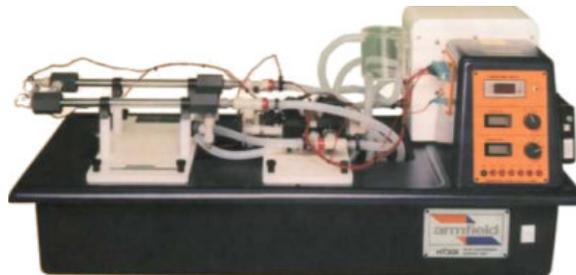
$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{m \ln} \quad (6)$$

Donde  $A$ , representa el área de transferencia de calor;  $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor y representa la sumatoria del inverso de todas las resistencias al flujo de calor que existen entre la corriente caliente y la corriente fría.

$$U = \frac{1}{\sum R_t} \quad (7)$$

Y por último,  $\Delta T_{m \ln}$  representa la diferencia de temperatura media logarítmica, la cual a su vez es una forma de representar el cambio medio de la fuerza impulsora de la transferencia de calor a lo largo del equipo (diferencias de temperaturas de los fluidos a lo largo del su recorrido por el intercambiador).

### C.- Descripción del Equipo Experimental.



**Figura 1.** Equipo de trabajo conformado por la Unidad Estándar HT30X y el Intercambiador Doble Tubo HT31.

Fuente: Armfield. Heat Exchanger Training Equipment HT30X Series.

El montaje experimental consta de dos partes básicas: la unidad estándar HT30X a la cual se adaptan diferentes equipos de transferencia de calor suministrados por el fabricante (Armfield): el intercambiador de tubo y coraza, intercambiador de placas y el intercambiador doble tubo HT31 propiamente dicho (figura 1). A continuación se detallan las características principales de ambas partes.

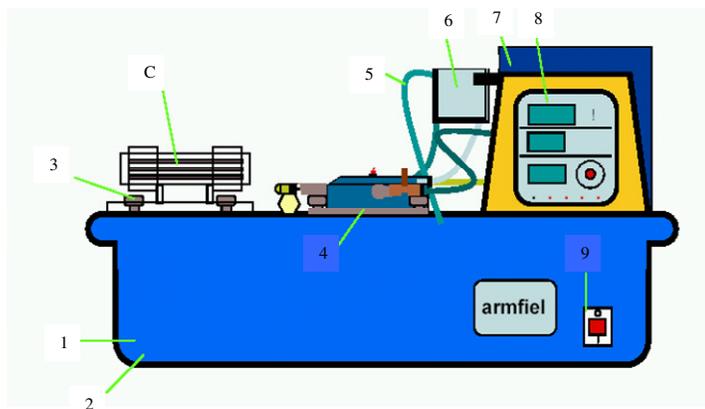
#### Unidad Estándar HT30X

A modo general esta base posee el circuito de flujo de agua, tanto fría como caliente, el sistema de medición de flujos, de bombeo de agua caliente, de calentamiento y el panel de control.

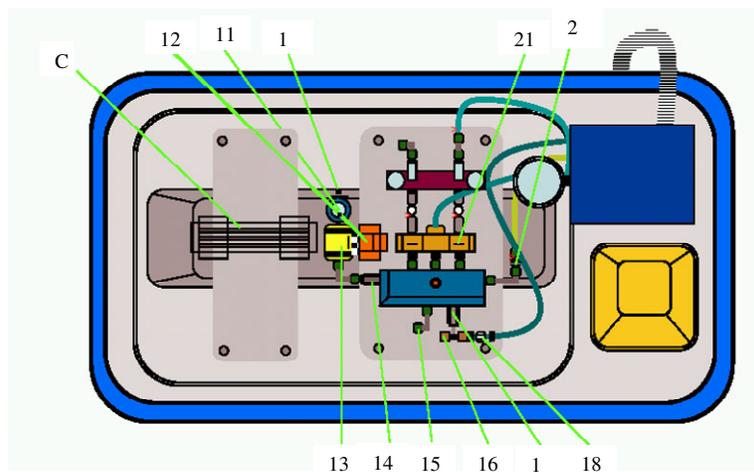
El circuito de agua caliente es un circuito cerrado que recircula constantemente el fluido. Se compone de un pequeño reservorio de agua, una bomba, resistencia eléctrica, un medidor de flujo, una

válvula reguladora de caudal (por bypass) y un pequeño sistema de control de calentamiento. *Este circuito es operado únicamente con agua destilada con el fin de evitar deposición de sales dentro del mismo.*

El circuito de agua fría es un sistema abierto que permite tomar agua de la calle, hacerla circular por el equipo y posteriormente enviarla al desagüe. Este sistema posee una válvula que permite regular manualmente el flujo de agua fría en conjunto con el medidor de flujo y el panel de control. Las mangueras de este sistema pueden ser fácilmente manipuladas para establecer la configuración de operación del equipo requerida (cocorriente o contracorriente). Por último, el panel de control permite fijar la temperatura a la cual se calentara el agua caliente. Al fijar esta temperatura es recomendable colocarle dos (2) grados centígrados más de los requeridos en la entrada del fluido caliente al intercambiador. Además de esto, el panel de control permite leer los valores de los flujos y temperaturas de las corrientes en diversos puntos. En las figuras 2 y 3, se muestran detalladamente las partes más importantes de la Unidad Estándar HT30X.



**Figura 2.** Vista frontal de la Unidad Estándar HT30X.



**Figura 3.** Vista superior de la Unidad Estándar HT30X.

Leyenda:

A.- Base de la Unidad de Servicios formada por:

- (1) Válvula (para drenaje de agua).
- (2) Base/soporte.
- (3) Tornillos.
- (4) Plato base.
- (5) Manguera de desagüe.
- (6) Recipiente de agua caliente.
- (7) Calentador de agua.
- (8) Consola de control.
- (9) Interruptor principal.
- (10) Entrada de agua fría.
- (11) Filtro de agua.
- (12) Regulador de presión.
- (13) Botón de ajuste de presión.
- (14) Válvula de control manual que permite variar el flujo de agua fría.
- (15) Salida de agua caliente.
- (16) Entrada de agua caliente.
- (17) Válvula de control de agua caliente (*bypass*).
- (18) Sensor de temperatura.
- (19) Sensor de flujo del agua caliente.
- (20) Salida de agua fría.
- (21) Sensor de flujo en miniatura tipo turbina del agua fría.
- (22) Panel de control (indicador de temperaturas, indicador de caudal de flujo, controlador de temperatura del circulador de agua caliente).

B.- Circulador de agua caliente con un vaso de llenado.

C.- Intercambiador de calor

### **Detalles técnicos del Intercambiador Doble Tubo HT31.**

El equipo consiste en dos tubos concéntricos dividido en dos secciones de igual longitud, arregladas en serie, en forma de U y con las siguientes características:

**Tabla 1.** Dimensiones y características del intercambiador de calor doble tubo HT31.

Elaborado con información extraída de: Armfield. Heat Exchanger Training Equipment HT30X Series.

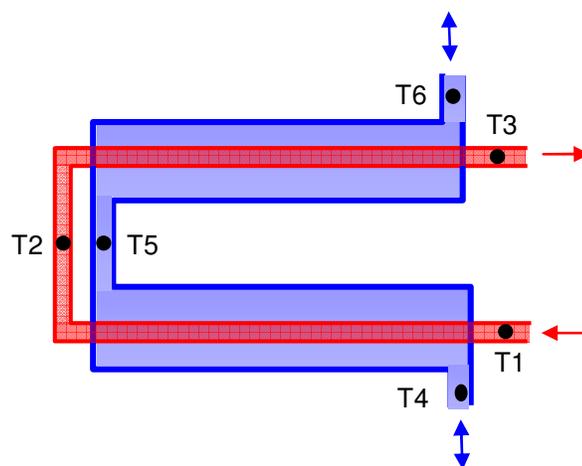
	Material de construcción	Dimensiones [mm] <sup>1</sup>			Fluido <sup>3</sup>
		Diámetro		Longitud <sup>2</sup> (L)	
		Interno (Dint)	Externo (Dext)		
Tubo interno	Acero inoxidable	-----	9,5	330	Caliente
Tubo externo	Acrílico Transparente	12,0	-----	330	Frío

1\_Todas las dimensiones están en milímetros.

2\_Longitud del Intercambiador para cada sección de intercambiador. El área de transferencia de calor combinada para ambas secciones es de aproximadamente 20 000 mm<sup>2</sup>. Esta área es equivalente a la del intercambiador de tubo y coraza HT33 con el fin de poder realizar comparaciones directas.

3\_La disposición del fluido frío por la sección anular y caliente por el interior del tubo interno permite minimizar las pérdidas de calor al ambiente.

Los medidores de temperatura (termocuplas) son de Tipo K y están identificados e instalados como se muestra en la figura 4 y en la información de la tabla 2.

**Figura 4.** Diagrama esquemático del equipo de intercambio de calor doble tubo.

En el caso reutilizar el intercambiador de tubo y carcasa, las características se muestran en la siguiente tabla

**Tabla 2.** Dimensiones y características del intercambiador de calor Tubo y carcasa.

Elaborado con información extraída de: Armfield. Heat Exchanger Training Equipment HT30X Series.

	Material de construcción	Dimensiones [mm] <sup>1</sup>			Fluido <sup>3</sup>
		Diámetro		Longitud (L)	
		Interno (Dint)	Externo (Dext)		
7 Tubos <sup>2</sup>	Acero inoxidable	-----	6,35	144	Caliente
Coraza <sup>4</sup>	Acrílico Transparente	39,0	-----	330	Frío

1\_Todas las dimensiones están en milímetros.

2\_Espesor de los tubos: 0,6mm

3\_La disposición del fluido frío por la coraza y el caliente por el interior de los tubos permite minimizar las pérdidas de calor al ambiente.

4\_Espesor de la pared de la coraza: 3,0 mm

**Tabla 3.** Identificación del punto de medición para cada termopar según la configuración de operación del intercambiador doble tubo HT31.

Termopar	Temperatura del fluido (T <sub>i</sub> ± 0,1) [°C]	Configuración	
		Co-corriente	Contracorriente
1	T1	Entrada caliente	
2	T2	Punto medio caliente	
3	T3	Salida caliente	
4	T4	Entrada frío	Salida frío
5	T5	Punto medio frío	
6	T6	Salida frío	Entrada frío

**Tabla 4.** Propiedades del Agua

Fuente: Perry. Tomo I, 1996

Temperatura (°C)	Densidad ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacidad calorífica (Cp) [cal/g.°C]
40	992,215	1,0
60	983,200	1,0

**D.- Procedimiento Experimental**

Para el desarrollo experimental de esta práctica se recomienda realizar experiencias donde se varíen los flujos volumétricos de agua fría y agua caliente en cada configuración (cocorriente o contra corriente), de forma que se puedan comparar los resultados de mejor forma. Las relaciones de flujo volumétrico propuestas son:

$$\frac{\left( \begin{array}{c} \text{Caudal} \\ \text{Caliente} \end{array} \right)}{\left( \begin{array}{c} \text{Caudal} \\ \text{frío} \end{array} \right)} :$$


---


$$1:1$$


---


$$1:2$$


---


$$2:1$$


---

**Nota:** La relación indicada se refiere a la proporción de caudales. Por ejemplo si el caudal de agua caliente es 1,5 l/min y la relación mostrada anteriormente es 1:2, el caudal de agua fría será el doble del caudal caliente, es decir 3 l/min.

A continuación se presenta el procedimiento experimental a seguir para obtener los datos necesarios para el cumplimiento de los objetivos de la práctica (los números indicados en paréntesis dentro del procedimiento experimental, corresponden a los elementos detallados en las figuras 2 y 3 de la sección de descripción del equipo):

1. Medir temperatura ambiente.
2. Verificar que todas las mangueras se encuentre correctamente conectadas y tomar nota de la configuración de operación inicial.

3. Verificar que el reservorio del agua caliente (6) este lleno al menos tres cuartas partes de su altura total. En caso contrario, completar únicamente con agua destilada.
4. Encender el equipo en el interruptor principal (9) y encender la bomba de circulación del agua caliente.
5. Fijar el set-point de la temperatura de agua caliente en aproximadamente 43 grados centígrados para garantizar que el agua caliente en la entrada tenga un temperatura aproximada a 40 grados centígrados (el set point se debe colocar entre dos y tres grados por encima de la temperatura deseada en T1 a fin de compensar las pérdidas de calor asociadas al recorrido del agua entre el punto de medición de la temperatura controlada y la entrada del intercambiador). El set point se fija en el panel de control (8).
6. Fijar el caudal de agua caliente en 1,5 l/min utilizando la válvula bypass correspondiente (18).
7. Abrir el paso de agua fría de la calle.
8. Regular el caudal de agua fría en 1,5 l/min.
9. Esperar que el sistema se estabilice.
10. Medir y reportar en la tabla de datos experimentales, los valores de caudal de agua fría, caudal de agua caliente, T1, T2, T3, T4, T5 y T6.
11. Repetir el paso 10 dos veces mas.
12. Cambiar el caudal de agua fría (primero a 0,75 l/min y luego a 3 l/min) y repetir los pasos del 9 al 11 para cada valor de caudal.
13. Cerrar la válvula de paso del agua fría de la calle.
14. Cambiar la posición de conexión de las mangueras del agua fría, a fin de cambiar la configuración de operación del equipo (cocorriente o contracorriente).
15. Repetir los pasos del 7 al 13.
16. OPCIONAL: Cambiar la temperatura de calentamiento en el panel de control (8), primero para 50 °C y luego para 60 °C. En cada caso repetir los pasos del 8 al 15; para los caudales y configuración especificados por el profesor.

17. Apagar la bomba del agua caliente.
18. Apagar el equipo en el interruptor principal (9).
19. Medir la temperatura ambiente y reportarla en la tabla de recolección de datos experimentales. Este dato permite discutir sobre la magnitud de las pérdidas al ambiente en función a las diferencias de temperatura entre el agua fría y el ambiente (es recomendable poseer al menos el valor de la temperatura del ambiente al inicio y al final de la práctica).
20. Verificar que todo quede limpio y seco.

#### **D.- Cálculos**

- Determinar el calor liberado por el agua caliente, el calor absorbido por el agua fría y el calor perdido al ambiente con el sistema funcionando en co-corriente y en contracorriente, para diferentes caudales de flujo del agua caliente y fría y diferentes temperaturas de entrada del agua caliente.
- Calcular la diferencia de temperatura media logarítmica.
- Calcular el coeficiente global de transferencia de calor.
- Determinar las eficiencias globales y las eficiencias por temperaturas para cada una de las configuraciones adoptadas.

#### **E.- Cuestionario**

- 1.- Realice el balance de energía en un intercambiador de calor.
- 2.- ¿Por qué son despreciables los efectos de radiación?
- 3.- ¿Cuál es significado físico del coeficiente global de transferencia de calor? ¿Cómo lo determinan teóricamente y experimentalmente?
- 4.- ¿Qué factores se incluyen en el coeficiente global de transferencia de calor?
- 5.- ¿Para qué tipo de procesos es útil el intercambiador de calor de tubo y carcaza? ¿y un doble tubo?
- 6.- ¿Qué diferencias básicas existen entre un intercambiador que opera en co-corriente y uno en contracorriente?
- 7.- Dibuje las distribuciones de temperatura de un intercambiador con flujo en co-corriente y en contracorriente.
- 8.- ¿Cuál es la función de los *baffles* dentro de un intercambiador de calor tubo y coraza?
- 9.- ¿Qué diferencia existe entre una válvula y un *bypass*?
- 10.- ¿Qué es el factor de ensuciamiento y de qué depende?

- 11.- ¿Cuál es la condición indispensable que se debe cumplir antes de tomar cualquier medida? ¿Por qué?
- 12.- Mencione las aplicaciones industriales más importantes de este tipo de configuración de intercambiador.
- 13.- ¿Qué es necesario para que ocurra la transferencia de calor? ¿De qué factores depende la transferencia de calor y en qué forma?
- 14.- ¿Qué representan las eficiencias por temperatura?
- 15.- ¿En qué forma varía la eficiencia global al disminuir  $Q_c$  y al aumentar  $Q_h$ ?
- 16.- ¿Cuáles resistencias en serie encuentra el flujo de calor? ¿Cuál es la menor y por qué?
- 17.- ¿Cuál lado del intercambiador debería transportar el fluido sucio? ¿Por qué?
- 18.- ¿Qué configuración es más eficiente, co-corriente o contracorriente? ¿Por qué?
- 19.- ¿Cuál es el significado físico de las temperaturas medias logarítmicas? ¿Cómo se determina en el caso cocorriente? ¿y en contracorriente?

#### **F.- Referencias Bibliográficas**

1. Incropera, Frank y De Witt, David. (1996). Fundamentos de Transferencia de calor. Prentice Hall. 4ta Edición. México. México.
2. Armfield. Heat Exchanger Training Equipment HT30X Series. (Disponible online: <http://www.armfield.co.uk/>).
3. Perry (1996). Manual del Ingeniero Químico. Tomo I.

#### **G.- Bibliografía recomendada**

- 1.- Herranz, J. "Procesos de Transmisión de calor. Exposición y Problemas Resueltos". 1<sup>ra</sup> edición. Ediciones del Castillo, España 1978.
- 2.- Incropera, F. y D. De Witt. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer". 4<sup>ta</sup> edición. Editorial John Wiley & Sons, U.S.A., 1996.
- 3.- Kern, D.Q. "Process Heat Transfer". 1<sup>ra</sup> edición, International Student Edition, McGraw-Hill Book Company. U.S.A., 1950.
- 4.- Welty, J.R., R.E. Wilson y C.E. Wicks, "Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa". 1<sup>ra</sup> edición, Editorial Limusa S.A., México 1964.

**H. Apéndice****FORMATO DE RECOLECCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES**

Sección: \_\_\_\_\_ Grupo: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

Integrantes:

---



---



---

Temperatura ambiente inicial ( $T_{amb} \pm 0,1$ )[C]: \_\_\_\_\_Temperatura ambiente final ( $T_{amb} \pm 0,1$ )[C]: \_\_\_\_\_**Datos experimentales configuración contracorriente**

Temperatura deseada para el agua caliente [C]	Relación de caudal Caliente:Frío	Flujo agua caliente ( $F_{hot} \pm 0,1$ ) [l/min]	Flujo agua fría ( $F_{cold} \pm 0,1$ ) [l/min]	Temperaturas de la corrientes caliente y fría ( $T_i \pm 0,1$ ) [C]					
				T1	T2	T3	T4	T5	T6
	1:1								
	1:2								
2:1									
	1:1								
	1:2								

	2:1								
	1:1								
	1:2								
	2:1								

**Datos experimentales configuración cocorriente**

Temperatura de agua caliente (T±0,1) [C]	Relación de caudal Caliente:Frío	Flujo agua caliente (Fhot ±0,1) [l/min]	Flujo agua fría (Fcold ±0,1) [l/min]	Temperaturas de la corrientes caliente y fría (Ti±0,1) [C]					
				T1	T2	T3	T4	T5	T6
	1:1								
	1:2								
2:1									
	1:1								
	1:2								

	2:1								
	1:1								
	1:2								
	2:1								

**Observaciones:**


## PRÁCTICA 9C: INTERCAMBIADOR DE CALOR FLUJO LAMINAR VISCOSO

### A.- Objetivos

- Comparar la operación de un intercambiador de calor de tubo concéntrico en co-corriente y en contracorriente.
- Comprobar la primera ley de la termodinámica para un intercambiador de calor.
- Determinar el coeficiente de transferencia de calor para el agua y el aceite con su superficie respectiva y el coeficiente global de transferencia de calor.
- Determinar las eficiencias globales del intercambiador.

### B.- Fundamentos Teóricos

La transferencia de calor es un proceso de gran importancia en la industria ya que en incontables aplicaciones es necesario transferir calor de un líquido caliente a uno frío. El calor se transmite siempre que exista un gradiente de temperatura a través de tres modos bien conocidos: conducción, convección y radiación. El uso de este tipo de intercambiador en la industria es limitado debido a la necesidad de amplios espacios para su funcionamiento. Suelen utilizarse para enfriar los aceites lubricantes de diversos motores, desde carros hasta turbinas industriales.

Para realizar un análisis a un intercambiador de calor es necesario relacionar la transferencia de calor con las temperaturas observables en el equipo. En este análisis debe incluirse también la determinación de los coeficientes de transferencia global y convectivos, así como también el área superficial de transferencia a través de la cual fluye el calor.

La transferencia de calor de un fluido a otro puede determinarse de la primera ley de la termodinámica de la cual se obtiene la siguiente expresión:

$$q = m.C_p.(T_o - T_i) \quad (1)$$

donde:

q: calor transferido [W]

m: flujo másico [kg/s]

C<sub>p</sub>: calor específico del fluido frío [J/kg.K]

T<sub>o</sub>: temperatura de salida del fluido

T<sub>i</sub>: temperatura de entrada

Conociendo esta relación se puede determinar el flujo de calor  $q$ . Sin embargo, es necesario definir más parámetros con el objetivo de tener más conocimientos al momento de diseñar un intercambiador. Bajo esta circunstancia es necesario definir el flujo de calor en función de parámetros que estén relacionados directamente al intercambiador. De esta forma se plantea el flujo de calor  $q$  de la siguiente manera:

$$q = U.A.\Delta T_{lm} \quad (2)$$

donde:

U: coeficiente global de transferencia de calor [ $W/m^2.K$ ]

A: área de transferencia en base a la cual se define U [ $m^2$ ]

$\Delta T_{lm}$ : diferencia media logarítmica [K]

Teóricamente U se define de la siguiente manera:

$$U = \frac{1}{\sum R_t} \quad (3)$$

donde  $\sum R_t$  es la sumatoria de las resistencias térmicas entre un fluido y otro; y es el término donde aparecen implícitas las dimensiones del intercambiador.

### **C.- Descripción del Equipo**

El equipo experimental consta de un intercambiador tipo doble tubo con aceite caliente fluyendo a través del tubo central mientras el agua de enfriamiento. Los termopares mostrados en la Fig. 9C.1 registran las temperaturas del flujo de entrada y salida del aceite caliente y del agua fría, y del tubo de metal en cada extremo de la superficie de transferencia de calor.

- Circuito de aceite caliente:

Aceite caliente de un tanque equipado con un calentador del tipo de resistencia eléctrica, es bombeado dentro del extremo superior del tubo central del intercambiador de calor. El aceite es enfriado a medida que fluye hacia abajo a través del intercambiador de calor, y al salir de la parte inferior, pasa a través de una válvula de control a un tanque de vidrio de medición equipado con una escala de medición de contenido. El tanque de medición contiene una válvula de acción rápida que le permite al aceite volver al tanque de calentamiento.

- Circuito de agua fría:

El ducto de agua fría pasa a través de una válvula de control de flujo a una unión con un extremo del intercambiador de calor. Una unión similar conecta el otro extremo con el punto del drenaje. Las conexiones son reversibles y el agua de enfriamiento podrá hacerse fluir hacia abajo (co-corriente) o hacia arriba (contracorriente).

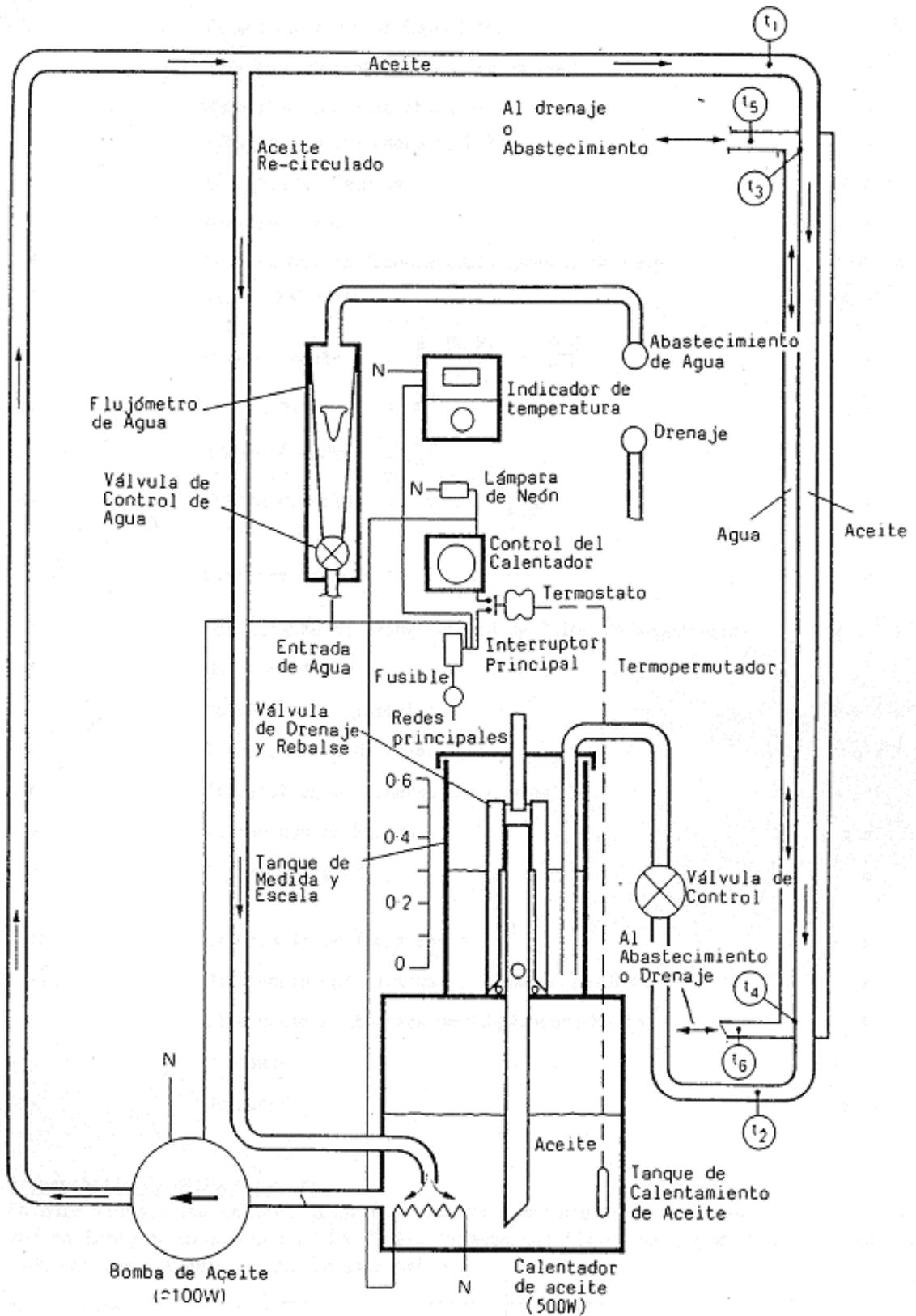


Figura 9C.1: Unidad de transferencia de calor flujo Laminar/Viscoso.

- Temperatura:

Un termómetro digital con un interruptor selector, muestra la temperatura registrada por los termopares de temperatura de aceite, agua y metal con una apreciación de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$

- Transferencia de calor:

La unidad de transferencia de calor en flujo laminar viscoso H970 P.A. Hilton consta de:

- a) Un panel plástico reforzado con vitrofibra de terminación pulida en el cual están ubicados todos los componentes de la unidad.
- b) Un intercambiador de calor de doble tubo de cobre, equipado con seis termopares tipo K para medir las temperaturas de aceite, agua y superficie de la tubería interna en los extremos.
- c) Un tanque de calentamiento con una capacidad aproximada de 2,5 litros, equipado con tapa y un calentador de 500 W del tipo de resistencia eléctrica.
- d) Un tanque de medición de vidrio pyrex con una capacidad de medida de 0,5 litros: equipado con tapa, indicador de volumen medido y una válvula de desagüe/rebalse que debe ser girada  $90^{\circ}$  para obtener las posiciones mencionadas.
- e) Una bomba centrífuga de 1 hp de potencia sin empaquetadura provista de un indicador para tres potencias diferentes.
- f) Un indicador de temperatura digital con un selector para seis posiciones, con una apreciación de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .
- g) Un rotámetro con alcance de 4 a 50 g/s.

Descripción del intercambiador:

- Tubo central:

Material: cobre

Diámetro externo: 12,7 mm

Diámetro interno: 11,3 mm

Largo efectivo: 910 mm

Área externa de transferencia de calor:  $0,0365\text{ m}^2$

Área interna de transferencia de calor:  $0,0323\text{ m}^2$

Área media de transferencia de calor:  $0,0342\text{ m}^2$

Área de flujo de transferencia de calor:  $9,67 \cdot 10^{-7}\text{ m}^2$

- Tubo externo:

Material externo: cobre

Diámetro externo: 15,9 mm

Diámetro interno: 14,4 mm

Área de flujo de corona circular:  $3,62 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$

#### D.- Precauciones y advertencias

1. Esta unidad no debe ser usada a menos que contenga aceite hasta el nivel correcto (cuando está fría y con el tanque de medición vaciado hacia el tanque de calentamiento, la profundidad de aceite en el tanque de calentamiento debe ser de 75 mm). Esto podrá revisarse con una varilla pesada a través del ducto de drenaje del tanque de medición después de sacar la válvula.
2. Desconecte siempre la unidad de las redes principales (corriente, agua) antes de sacar el panel trasero.
3. La temperatura de salida del aceite no deberá dejarse exceder de  $80^\circ\text{C}$ . Se vuelve a poner el termostato si ésta es excedida.

Propiedades del Vitrea 22:

$$C_p \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \right] = 4,187 + \frac{0,388 * 0,00045 * T_m [^\circ\text{F}]}{\sqrt{0,862}} \quad (4)$$

donde:

$$T_m = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (5)$$

$$k \left[ \frac{\text{w}}{\text{m.K}} \right] = 0,144 \cdot \frac{(0,1821 - 0,000244 * T_m [^\circ\text{F}])}{0,87} \quad (6)$$

$$\gamma(40^\circ\text{C}) = 22 \text{ cst}$$

$$\gamma(100^\circ\text{C}) = 4,22 \text{ cst}$$

$$\text{g.e.} = 0,862$$

#### E.- Cálculos

- Comprobar la primera ley de la termodinámica.
- Calcular el coeficiente de transferencia de calor para el agua y el aceite con su superficie respectiva.
- Determinar el coeficiente de transferencia de calor global.
- Comparar los perfiles de temperatura en el intercambiador operando tanto en co-corriente como en contracorriente.

- Determinar las eficiencias globales del intercambiador.

### F.- Cuestionario

- 1.- ¿Cuáles son los fenómenos de transferencia de calor que intervienen en la operación del intercambiador? Escriba las ecuaciones.
- 2.- ¿Qué tipo de convección se presenta en un intercambiador de doble tubo y bajo qué condiciones están presentes?
- 3.- ¿Por qué se consideran despreciables los efectos de radiación?
- 4.- ¿Cómo se calcula y qué significado tiene el coeficiente de transferencia de calor convectivo?
- 5.- ¿Para qué tipo de procesos es útil el intercambiador de doble tubo?
- 6.- ¿Qué suposiciones se deben hacer al trabajar con un intercambiador de doble tubo?
- 7.- ¿Qué diferencias básicas hay entre un intercambiador en contracorriente y uno en co-corriente?  
¿Cuál es más eficiente y por qué?
- 8.- ¿Es posible que en alguno de los dos intercambiadores la temperatura de salida del fluido frío exceda la del fluido caliente? ¿Por qué?
- 9.- ¿Cómo varía el coeficiente convectivo con respecto a la variación del flujo másico del fluido?
- 10.- ¿Qué sucedería si el intercambiador no está aislado del ambiente? Explique detalladamente este fenómeno.
- 11.- Dibuje las distribuciones de temperatura en un intercambiador de flujo en co-corriente y en contracorriente.
- 12.- ¿De qué factores depende el coeficiente global de transferencia de calor?
- 13.- ¿Qué variables se necesitan medir para cumplir los objetivos de la práctica?
- 14.- ¿Qué es el factor de ensuciamiento y de qué depende?
- 15.- ¿Cómo se calcula el coeficiente convectivo de cada fluido?
- 16.- ¿Cómo se determina la influencia de la velocidad del fluido en el coeficiente convectivo?
- 17.- ¿Cómo se calculan los calores absorbidos (o liberados) de los fluidos? ¿Deben ser iguales? ¿Cuál utilizará en sus cálculos? ¿Por qué?
- 18.- ¿Cuántas resistencias en serie encuentra el flujo de calor desde el fluido caliente al frío? Mencíonelas y explique cual de ellas es la menor.
- 19.- Escriba cada una de las ecuaciones que va a necesitar para lograr los objetivos de la práctica. Detalle cada uno de los términos involucrados.
- 20.- Explique la influencia de *baffles* dentro del intercambiador.
- 21.- ¿En qué condiciones de operación se espera que el intercambiador sea más eficiente?

**G.- Bibliografía**

- 1.- Welty, J. R., R. E. Wilson y C. E. Wicks, "Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa", 1<sup>ra</sup> edición, Editorial Limusa S. A., México, 1984.
- 2.- Incropera, Frank P. y David P. de Witt. "Fundamentals of heat and mass transfers". Tercera edición. John Wiley & Sons. Canadá, 1990.
- 3.- Bird B., Warner E. Stewart y Edwin N. Lightfoot. "Fenómenos de Transporte". Segunda edición. Ediciones Repla S. A. México, 1987.
- 4.- Mc Cabe, Warren L. Julian C. Smith. "Operaciones Básicas de Ingeniería Química". Editorial Reverté, S.A., España, 1978.

## PRÁCTICA 10C: SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

### A.- Objetivos

- Establecer las condiciones e instrumentos de operación
- Determinar el calor del evaporador, trabajo del compresor y coeficiente de operación del sistema sin intercambiador de calor
- Determinar el calor del evaporador, trabajo del compresor y coeficiente de operación del sistema con intercambiador de calor
- Comparar el sistema de refrigeración para las dos situaciones anteriormente planteadas
- Comparar el sistema de refrigeración experimental con un ciclo ideal a través de la eficiencia del mismo

### B.- Fundamentos Teóricos

La refrigeración es una aplicación práctica de la termodinámica, por tal razón, es importante entenderla con detenimiento. Existen varios métodos para lograr la refrigeración: los ciclos de refrigeración mecánicos de vapor, ciclos de absorción, ciclos de chorro de vapor, entre otros. Aquí se estudiará el ciclo de refrigeración mecánico de vapor.

La primera ley aplicada a los ciclos de refrigeración explica que un ciclo termodinámico ocurre cuando un fluido de trabajo, partiendo de un estado inicial de equilibrio, definido por su temperatura y presión, sufre una serie de procesos que lo llevan nuevamente al estado inicial de equilibrio, es decir, a la misma temperatura y presión.

Cada uno de estos procesos está regido por la primera ley de la termodinámica para sistemas abiertos; partiendo de esta ley, cada proceso tendrá una ecuación característica, como se verá más adelante. La primera ley de la termodinámica está definida como (Müller, 2002):

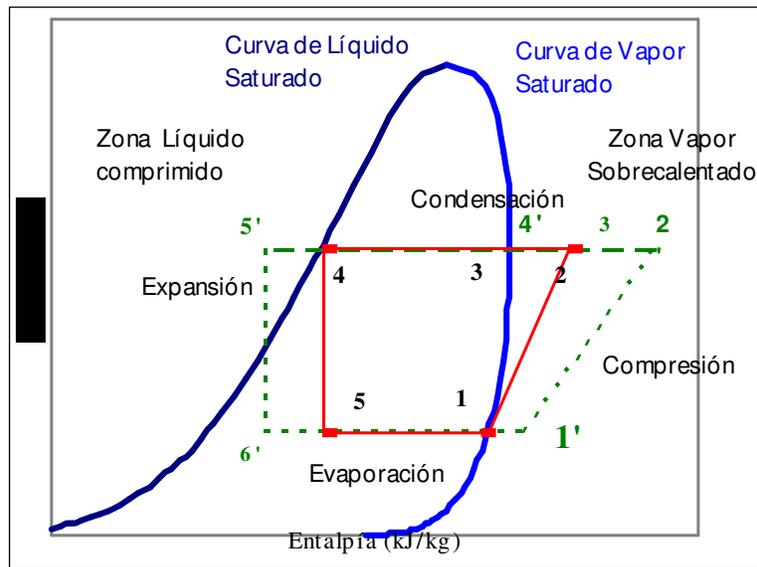
$$Q + \sum_{\text{entrada}} m \left( h + \frac{1}{2} \text{Vel}^2 + gz \right) = \frac{dE}{dt} + \sum_{\text{salida}} m \left( h + \frac{1}{2} \text{Vel}^2 + gz \right) + W \quad (1)$$

El ciclo de refrigeración es utilizado para eliminar calor de un medio frío y transferirlo a un medio más caliente usando las propiedades térmicas del refrigerante. El costo de esta transferencia de calor es la potencia suministrada por el compresor. El refrigerante debe alcanzar temperaturas menores al ambiente o medio a enfriar y temperaturas más elevadas que el medio a donde se transfiere el calor.

Los componentes básicos para el ciclo de compresión de vapor son el compresor, el evaporador, el condensador y la válvula de expansión.

Los diagramas que se usan en el análisis del ciclo de refrigeración por compresión por vapor son los diagramas de presión – entalpía.

De acuerdo a la figura 1 existen tres regiones. La región de la izquierda de la curva de líquido saturado, se denomina zona de líquido comprimido. La región de la derecha de la curva de vapor saturado, se llama zona de vapor sobrecalentado. En la región central el fluido se encuentra en equilibrio líquido-vapor.



**Figura 1.** Diagrama Presión –Entalpía del R-12

**Ciclo ideal:** El ciclo ideal de refrigeración es representado por la línea continua de la figura 1, este es el ciclo saturado de refrigeración y es un ciclo teórico. El fluido entra al compresor como vapor saturado en 1, donde es elevada su presión y su temperatura por la compresión hasta el estado 2, transformándose en vapor sobrecalentado. La compresión es isentrópica, no hay fricción y el proceso es adiabático.

De 2–3 se representa el enfriamiento del vapor, desde la temperatura de salida del compresor hasta la temperatura de vapor saturado. En este recorrido no existe cambio de fase, manteniéndose vaporizado el refrigerante. Además, la presión se mantiene constante. La diferencia entre las entalpías del refrigerante entre los puntos 2 y 3 se denomina calor sensible el cual se define como la cantidad de calor que cede o absorbe un cuerpo sin cambiar de estado. Entre los puntos 3–4 ocurre la condensación del vapor, por lo tanto, el cambio de fase de vapor a líquido. La condensación es a presión y temperatura constante y el calor entregado al medio es la diferencia de entalpías entre

los puntos 3 y 4. Este es el calor latente, que se define como la cantidad de calor que tiene que adsorber o dar un kilogramo de refrigerante para cambiar de fase.

En el trayecto 2-4 está operando el condensador. El calor disipado durante el proceso de condensación, partiendo de la ecuación de la termodinámica para sistemas abiertos (1), se suponen las siguientes condiciones: no hay variación de altura entre los dos puntos, la velocidad se mantiene constante, no se realiza trabajo y el sistema se encuentra en estado estacionario. Resultando así la siguiente ecuación característica del condensador:

$$Q = m \cdot (h_2 - h_4) \quad (2)$$

El líquido a alta presión pasa a través de la válvula de expansión, 4-5, donde disminuye su presión y temperatura y se convierte en una mezcla líquido-vapor. El proceso de expansión es adiabático y la entalpía del fluido no varía durante el proceso. La válvula de expansión tiene la finalidad de disminuir la presión del fluido.

En una válvula de expansión no se realiza trabajo y además es un proceso muy rápido se puede suponer que no hay transferencia de calor. Asimismo, no hay variación de la altura, por tal razón, la energía potencial se cancela. En este equipo no hay cambio en el área de flujo, entre la entrada y la salida, siendo la variación de la velocidad insignificante, eliminándose la energía cinética, además el proceso es en estado estacionario. Dentro del volumen de control sí hay variación de área de flujo y diversos perfiles de velocidad, pero como no hay acumulación, la velocidad de entrada debe ser la misma que la de salida. El balance de energía final es (Müller, 2002):

$$h_e = h_s \quad (3)$$

El fluido a baja presión entra al evaporador y es evaporado por absorción de calor, a presión y temperatura constante, siendo vapor saturado. En esta etapa la entalpía del fluido aumenta y absorbe calor del ambiente. El calor absorbido es la diferencia entre las entalpías entre 5 y 1. El balance energía para el evaporador, cumple las mismas condiciones que para el condensador resultando:

$$Q = m \cdot (h_1 - h_5) \quad (4)$$

El trayecto 1-2 ocurre en el compresor, en esta etapa, la presión del vapor aumenta desde las condiciones de evaporación hasta las condiciones de condensación. Paralelamente ocurre un aumento en la temperatura. Este proceso es isentrópico por ser un proceso adiabático y sin fricción. El trabajo realizado por el compresor es:

$$W = m \cdot (h_2 - h_1) \quad (5)$$

Finalmente, el refrigerante entra al condensador y se repite el ciclo.

**Ciclo Real:** Los ciclos de refrigeración reales se desvían del ciclo saturado simple. Se considera los efectos de subenfriamiento del líquido y sobrecalentamiento del vapor de succión. En la Figura 1 la línea punteada representa el ciclo real de refrigeración. En el ciclo ideal, el refrigerante entra al compresor como vapor saturado. En el ciclo real la temperatura de salida del evaporador es 5 °C mayor que la temperatura de evaporación del refrigerante.

$$T1' = T1 + 5 \text{ °C} \quad (6)$$

La finalidad del sobrecalentamiento es que el refrigerante entre como vapor sobrecalentado en el compresor, ya que existe la posibilidad de que pequeñas partículas de refrigerante no vaporizado sean atrapadas en el vapor. Este vapor “húmedo” no puede ingresar al compresor porque puede ocasionarle daños.

El refrigerante sale del compresor como vapor sobrecalentado, a través de las tuberías existe transferencia de calor al medio ambiente, disminuyendo la temperatura de entrada al condensador. Observando la figura 1, tenemos que:

$$T3' = T2' - 15 \text{ °C} \quad (7)$$

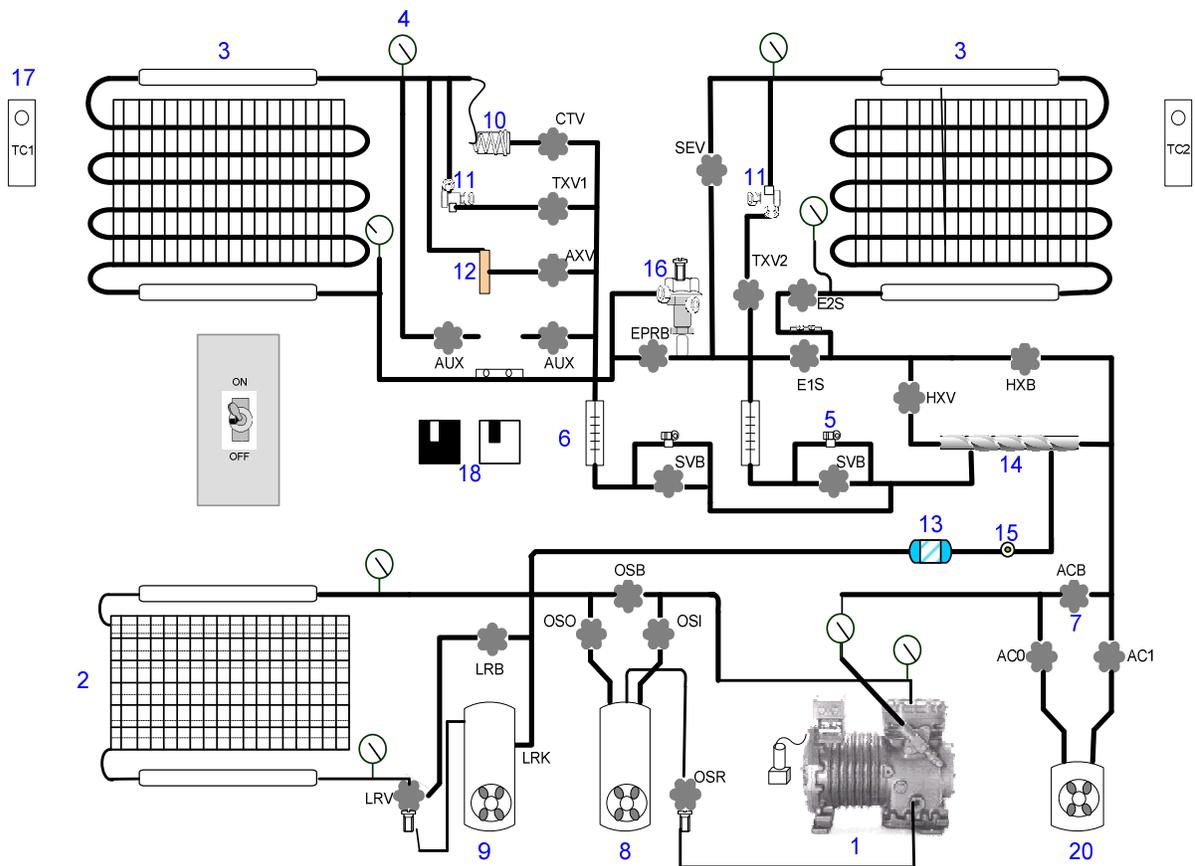
A la salida del condensador puede ocurrir subenfriamiento del refrigerante. Con frecuencia, el líquido refrigerante se subenfriaba al ser recolectado en un tanque receptor del líquido o al pasar a través de la línea del líquido, transmitiendo calor al medio circundante.

En los ciclos ideales se desprecian las caídas de presión en las líneas del evaporador y el condensador, en el ciclo real también se desprecia porque en el sistema estudiado la variación de presión es despreciable.

### C.- Descripción del Equipo

1. Compresor.
2. Condensador.
3. Dos evaporadores.
4. Ocho manómetros.
5. Dos válvulas solenoides.
6. Dos rotámetros.

7. Veintitrés válvulas manuales.
8. Separador de aceite.
9. Contenedor de líquido.
10. Tubo capilar.
11. Dos válvulas termostáticas de expansión.
12. Válvula de expansión automática.



**Figura 2.** Equipo de refrigeración

13. Filtro secador.
14. Intercambiador de calor.
15. Visor de humedad.
16. Válvula de presión constante.
17. Controladores de temperatura.
18. Controladores de presión.
19. Encendido y apagado del equipo, compresor y ventiladores de evaporadores y condensador.
20. Acumulador de líquido.

## **D.- Procedimiento Experimental**

### I. Sistema de refrigeración simple utilizando el tubo capilar como dispositivo de expansión.

1. Verificar que todas las válvulas estén cerradas
2. Encender el equipo
3. Abrir las siguientes válvulas: la válvula de entrada del separador de aceite OSO, la válvula de salida del separador de aceite OSI, la válvula de entrada del tanque de succión AC0, la válvula de salida del tanque de succión AC1, HXB, SVB1, EPRB, E1S, la válvula de entrada del acumulador de líquido LRV y CTV, esta última corresponde a la válvula del tubo capilar.
4. Colocar el evaporador 1 en el modo de ventilador Bajo y el condensador en el modo Alto.
5. Encender el compresor y esperar 5 minutos
6. Abrir la válvula OSR.
7. Esperar a que el sistema alcance el estado estacionario: Verificar que las presiones y temperaturas sean estables y en el rotámetro no haya burbujas.
8. Registrar los datos de presión y temperatura a la entrada y salida del: compresor, condensador y evaporador y flujo de refrigerante.
9. Colocar el termopar detrás del ventilador del evaporador 1 y medir temperatura del aire. Luego, colocar el termopar en la salida de aire del evaporador 1 y medir temperatura del aire.
10. Colocar el termopar detrás del ventilador del condensador y medir temperatura del aire. Luego, colocar el termopar en la salida de aire del condensador y medir temperatura del aire.
11. Cambiar el ventilador del evaporador 1 a Alto.
12. Esperar un tiempo prudencial.
13. Repetir el registro de los datos señalados en el punto 8, 9 y 10.

### II. Sistema de refrigeración simple utilizando la válvula automática como dispositivo de expansión.

1. Abrir AXV y LRV y cerrar CTV y LRB. Verificar que estén abiertas las siguientes válvulas: OSO, OSI, AC0, AC1, HXB, SVB1, EPRB, E1S, OSR y las siguientes cerradas HXV, ACB, SVB2, TXV2, SEV, E2S y TXV1.
2. Colocar el ventilador del evaporador 1 en Bajo. Se mantiene el condensador en Alto.
3. Esperar alcanzar el estado estacionario.
4. Registrar los datos de presión y temperatura a la entrada y salida del: compresor, condensador y evaporador y flujo de refrigerante.
5. Colocar el termopar detrás del ventilador del evaporador 1 y medir temperatura del aire. Luego, colocar el termopar en la salida de aire del evaporador 1 y medir temperatura del aire.
6. Colocar el termopar detrás del ventilador del condensador y medir temperatura del aire. Luego,

colocar el termopar en la salida de aire del condensador y medir temperatura del aire.

7. Cambiar el ventilador del evaporador 1 a Alto.
8. Esperar un tiempo prudencial.
9. Repetir el registro de los datos señalados en el punto 4, 5 y 6.

### III. Sistema de refrigeración simple utilizando la válvula termostática como dispositivo de expansión.

1. Abrir TXV1 y cerrar AXV. Verificar que estén abiertas las siguientes válvulas: OSO, OSI, AC0, AC1, HXB, SVB1, EPRB, E1S, OSR, LRV y las siguientes cerradas HXV, ACB, SVB2, TXV2, SEV, E2S, LRB y CTV.
2. Colocar el ventilador del evaporador 1 en Bajo. Se mantiene el ventilador del condensador en Bajo.
3. Esperar a que el sistema alcance el estado estacionario.
4. Registrar los datos de presión y temperatura a la entrada y salida del: compresor, condensador y evaporador y flujo de refrigerante.
5. Colocar el termopar detrás del ventilador del evaporador 1 y medir temperatura del aire. Luego, colocar el termopar en la salida de aire del evaporador 1 y medir temperatura del aire.
6. Colocar el termopar detrás del ventilador del condensador y medir temperatura del aire. Luego, colocar el termopar en la salida de aire del condensador y medir temperatura del aire.
7. Colocar el ventilador del condensador en Alto.
8. Esperar alcanzar el estado estacionario.
9. Anotar los mismos datos que los puntos 4, 5 y 6.
10. Colocar el ventilador del evaporador 1 en Alto.
11. Esperar alcanzar el estado estacionario.
12. Anotar los mismos datos que los puntos 4, 5 y 6

### IV. Uso del intercambiador de calor en el sistema de refrigeración.

*Utilizando el tubo capilar como dispositivo de expansión.*

1. Abrir CTV y LRB y cerrar TXV1 y LRV. Verificar que estén abiertas las siguientes válvulas: OSO, OSI, AC0, AC1, HXB, SVB1, EPRB, E1S, OSR y las siguientes cerradas HXV, ACB, SVB2, TXV2, SEV, E2S y TXV1.
2. Se abre la válvula HXV y se cierra HXB.
3. Colocar el ventilador del evaporador 1 en Bajo. Se mantiene el condensador en Alto.
4. Esperar alcanzar el estado estacionario.
5. Registrar los datos de presión y temperatura a la entrada y salida del: compresor, condensador y

evaporador y flujo de refrigerante.

*Utilizando la válvula automática como dispositivo de expansión.*

1. Abrir AXV y cerrar CTV. Verificar que estén abiertas las siguientes válvulas: OSO, OSI, AC0, AC1, HXV, SVB1, EPRB, E1S, OSR, LRV y las siguientes cerradas HXB, ACB, SVB2, TXV2, SEV, E2S, LRB y CTV.
2. Esperar a que el sistema alcance el estado estacionario.
3. Registrar los datos de presión y temperatura a la entrada y salida del: compresor, condensador y evaporador y flujo de refrigerante.

*Utilizando la válvula termostática como dispositivo de expansión.*

1. Abrir TXV1 y cerrar AXV. Verificar que estén abiertas las siguientes válvulas: OSO, OSI, AC0, AC1, HXV, SVB1, EPRB, E1S, OSR, LRV y las siguientes cerradas HXB, ACB, SVB2, TXV2, SEV, E2S, LRB y CTV.
2. Esperar a que el sistema alcance el estado estacionario.
3. Registrar los datos de presión y temperatura a la entrada y salida del: compresor, condensador y evaporador y flujo de refrigerante.

#### V. Sistema de evaporadores múltiples en paralelo utilizando la válvula de expansión termostática

1. Abrir HXB, E2S, SVB2 y TXV2; cerrar HXV.
2. Colocar los ventiladores de los evaporadores 1 y 2 en frecuencia baja y el ventilador del condensador en frecuencia alta.
3. Esperar alcanzar el estado estacionario.
4. Registrar presión y temperatura a la entrada y salida del compresor, condensador y evaporadores así como en el intercambiador.
5. Colocar los ventiladores de los evaporadores en el modo Alto y registrar nuevamente los datos.
6. Esperar alcanzar el estado estacionario.

#### **Apagado:**

1. Cerrar SVB1, SVB2 y OSR al mismo tiempo.
2. Esperar hasta que el compresor se apague solo.
3. Apagar los ventiladores de los evaporadores y condensador.
4. Apagar el equipo.

5. Cerrar todas las válvulas.

### **E. Cálculos**

- Identificar las condiciones de operación (entrada y salida del sistema)
- Calcular el calor transferido por el evaporador con y sin intercambiador de calor
- Calcular el trabajo del compresor con y sin intercambiador
- Determinar el COP para el dispositivo de expansión seleccionado

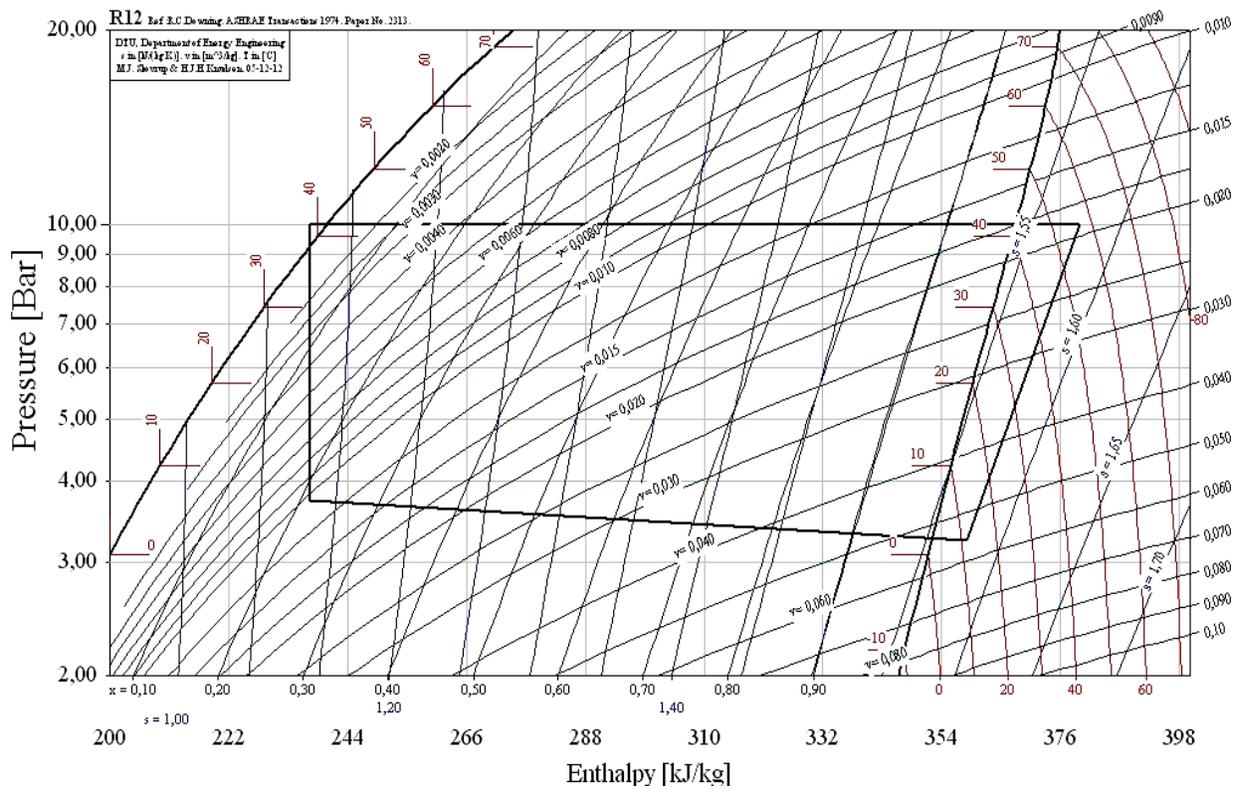
### **F.- Cuestionario**

1. ¿Cuáles son elementos de un sistema de refrigeración?
2. ¿Cuál es el principio de funcionamiento en un sistema de refrigeración?
3. ¿Qué es la humedad relativa?
4. ¿Qué es el punto de rocío?
5. ¿Qué diferencia existe entre la refrigeración por compresión y por absorción?
6. Señale en que situaciones es recomendable la refrigeración por absorción y en cuáles se recomienda la refrigeración por compresión.
7. ¿Qué son las PCM's? Nombre sus utilidades a nivel industrial

### **G.- Bibliografía**

- 1.- Dossat, R., "Principios de refrigeración", Editorial Continental, México, 1983.
- 2.- Dossat, R., "Principles of Refrigeration", 3ra edición, Prentice Hall, New Jersey, 1991.
- 3- Incropera, F. y DeWitt D., "Fundamentos de Transferencia de Calor", 4ta edición, Pearson Educación, 1996.
- 4.- Kamm, J., "A Laboratory Manual and Workbook of Refrigeration and Air-conditioning", Ohio, U.S.A., 1968.
- 5.- Muller, E., Termodinámica Básica, 2da edición, Sevilla, 2002.
- 6.- Perry, R. y Green, D. "Manual del ingeniero químico", Tomo III, 6ma edición, McGraw Hill, D.F., México, 1992.
- 7.- Perry, R. y Green, D. "Manual del ingeniero químico", vol. 2, 7ma edición, McGraw Hill, Madrid, 2001.
- 8.- Reed, G. "Refrigeración Manual Práctico para Mecánicos", Editorial Acribia, Zaragoza, 1994.
- 9.- Stoecker, W. "Refrigeration and air conditioning". McGraw- Hill in mechanical engineering. United States of America, 1958.

H.- Anexo



Anexo 1. Diagrama P vs H para la válvula termostática sin intercambiador de calor.

## PRÁCTICA 1R: RADIACIÓN TÉRMICA

### A.- Objetivos

- Determinar la emisividad de diferentes superficies (pulida, anodizado de plata y negro mate).
- Verificar la ley del coseno de Lambert.
- Verificar la ley del cuadrado inverso de la distancia.

### B.- Fundamentos Teóricos

Prácticamente en todas las operaciones que realiza el ingeniero químico interviene la producción o absorción de energía en forma de calor. Las leyes que rigen la transmisión de calor tienen por tanto una gran importancia. Uno de los mecanismos de transferencia de calor es la radiación, que a nivel industrial la encontramos en numerosos procesos como en sistemas de calefacción, hornos y secadores de calor radiante. También, ha sido utilizada en la medicina en procesos de rehabilitación. En los últimos años se han realizado estudios exhaustivos con el propósito de aprovechar la energía que emite el sol como una fuente alternativa, no contaminante, a los combustibles fósiles.

El término de “radiación” se aplica a aquellos procesos que transmiten energía por medio de ondas electromagnéticas o fotones. Se pueden presentar varios tipos de radiación: rayos X, rayos gamma, radiación térmica, etc.

La radiación térmica se refiere a la energía emitida por los cuerpos debido a su propia temperatura. Este tipo de transferencia de energía no necesita de la presencia de un medio para propagarse. Teóricamente el rango de la radiación térmica se extiende desde longitudes de onda cero hasta infinito, en la práctica la mayor porción de la energía de la radiación térmica cubre el rango entre 0,1-1000  $\mu\text{m}$  y la parte visible de dicha radiación va desde 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ .

La radiación que incide sobre un cuerpo es expresada por la relación:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1)$$

Para dos cuerpos que están en equilibrio térmico con alrededores comunes, la Ley de Kirchoff se puede expresar como:

$$\frac{E_1}{\alpha_1} = \frac{E_2}{\alpha_2} \quad (2)$$

De acuerdo a la Ley de Kirchoff un cuerpo negro posee el máximo poder emisor alcanzable a cualquier temperatura dada.

El poder de emisión de los cuerpos es menor que el del cuerpo negro y la relación  $E/E_n$  se conoce como emisividad ( $\varepsilon$ ) del cuerpo. El subíndice n se refiere al cuerpo negro.

La Ley de Stefan-Boltzman establece que el poder emisivo total de un cuerpo negro varía en razón directa a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

$$E_n = \sigma \cdot T^4 \quad (3)$$

donde:

$E_n$ : Poder emisivo del cuerpo negro.

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ).

La radiación total procedente de una unidad de área de un sólido opaco es:

$$\frac{Q}{A} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (4)$$

donde:

$Q/A$ : Calor por unidad de área [ $\text{W/m}^2$ ].

$\varepsilon$ : Emisividad [adimensional].

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzman [ $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ].

$T$ : Temperatura [K].

En la práctica las sustancias solamente emitirán esta cantidad de radiación hacia el vacío, a la temperatura del cero absoluto.

La relación matemática de la ley del cuadrado inverso de la distancia es:

$$q_{a-p} = \frac{I \cdot \cos \theta}{r^2} \quad (5)$$

La siguiente figura muestra un sistema conformado por una fuente emisora de luz y una fotopila, que se utilizará para la comprobación de la ley del coseno de Lambert. La energía radiante que alcanza al área  $dA_p$  es directamente proporcional a  $dA_1 \cos \theta_1 dA_p \cos \theta_2 I_1$  y varía inversamente con el cuadrado del radio de acuerdo con la siguiente expresión:

$$dq_{1-p} = \frac{I_1 \cdot dA_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot dA_p \cdot \cos \theta_2}{r^2} \quad (6)$$

Si la intensidad ( $I_1$ ) es constante, es decir, no depende del ángulo  $\theta$ , se dice que la superficie obedece a la ley del coseno de Lambert. Para el caso particular de la práctica se puede expresar como:

$$V = K \cdot \cos\theta \quad (7)$$

donde  $V$  es el voltaje leído en la termopila,  $\theta$  es el ángulo ya indicado y  $K$  es una constante.

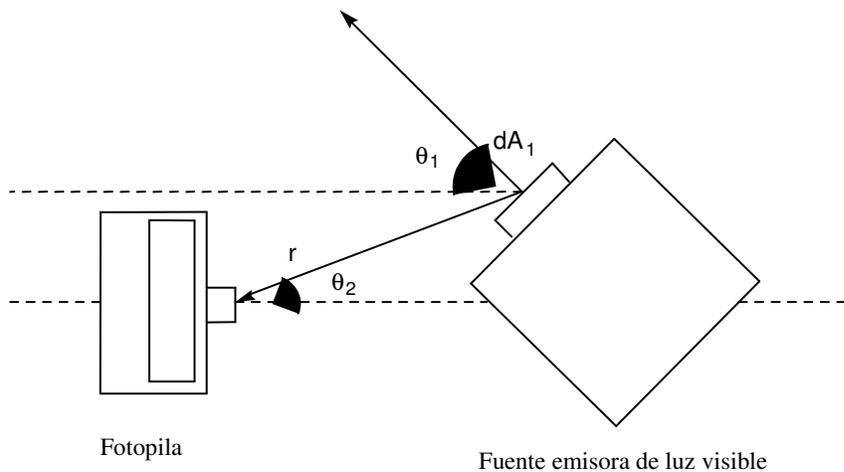


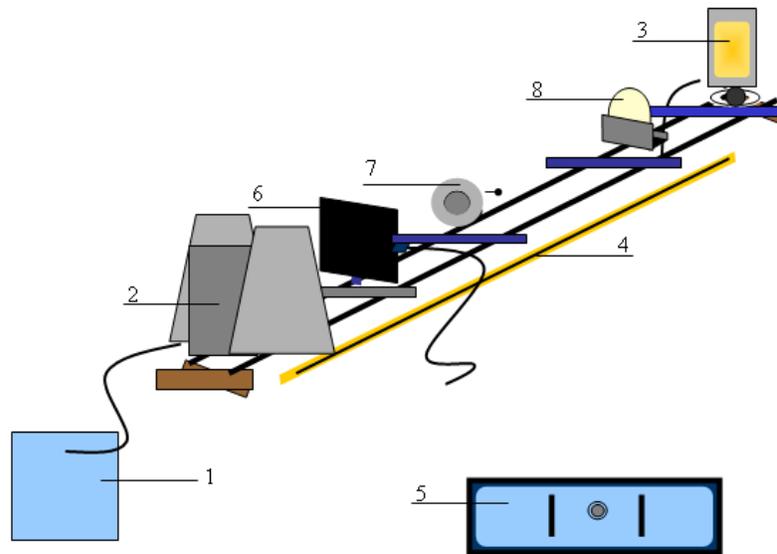
Figura 1R.1. Montaje de la Ley del coseno de Lambert. Vista de plano.

### C.- Descripción del Equipo

El equipo consta de (Ver figura 1R.2):

- a) Una vía montada en un banco horizontal (4) provista de:
  - Una fuente de radiación de calor en un extremo (2).
  - Una fuente de luz en el otro extremo (3).
  - Una escala reversible montada en el frente de la vía (4) para medir distancias.
- b) Una consola de instrumentación (5) controlada por un regulador de estado sólido y constituida por los siguientes elementos:
  - Un selector de termocuplas.
  - Dos conectores de termocuplas.
  - Un conector para las fuentes de calor y luz.
  - Un conector para el radiómetro.
  - Un regulador de potencia.

- Un termómetro digital.
- Una pantalla digital para mostrar la lectura del radiómetro.



**Figura 1R.2:** Diagrama del equipo.

c) Un transformador (1) situado debajo de la consola que provee un bajo voltaje para la fuente de calor.

d) Los siguientes accesorios:

- Soporte (6) para las tres placas metálicas de los siguientes acabados superficiales: pulida, anodizado de plata y negro mate, con pares térmicos acoplados.
- Un detector de radiación térmica (7).
- Un medidor de luz (8) con dos escalas de medición en LUX.

#### **D.- Procedimiento experimental**

En función de los objetivos a cumplir en esta práctica el procedimiento experimental se divide en tres experiencias.

##### **Primera Experiencia: Determinación de la Emisividad.**

1. Medir la temperatura del ambiente con ayuda de un termómetro digital
2. Encender la consola.
3. Conectar la fuente de calor a la consola.
4. Conectar el radiómetro a la consola.

5. Conectar una de las tres placas a la consola e insertar en el soporte dispuesto para ello.
6. Colocar la placa lo más cerca posible de la fuente de calor.
7. Colocar el radiómetro muy próximo a la placa.
8. Colocar la fuente de calor en el 50% de su capacidad.
9. Esperar a que se alcance el estado estacionario.
10. Registrar los valores de temperatura superficial en la placa y la potencia emisiva determinada por el radiómetro, alcanzados en el estado estacionario.
11. Repetir los pasos 5 a 10 para las otras dos placas.
12. Repetir los pasos 8 a 11 con la fuente de calor al 75% y al 100% de su capacidad.

Nota: Es importante seguir el orden de colocar un porcentaje de la capacidad de calentamiento de la fuente de calor, medir los valores en estado estacionario de todas las placas, y luego cambiar el porcentaje de capacidad para realizar nuevamente las mediciones de las placas. Este procedimiento optimiza el tiempo de realización de la experiencia.

#### **Segunda Experiencia: Verificación de la ley del cuadrado de la distancia.**

1. Retirar todas las placas del sistema.
2. Colocar la fuente de calor al 100%.
3. Deslizar el radiómetro por el carril, aflojando el tornillo inferior del mismo.
4. Desplazar el radiómetro hasta que se observe alguna lectura en el panel de la consola.
5. Establecer la distancia medida en la regla graduada como el punto de referencia (punto cero) para esta experiencia.
6. Esperar que se estabilice la lectura.
7. Reportar la distancia y la potencia emisiva determinada por el radiómetro.
8. Desplazar el radiómetro 10cm alejándolo de la fuente de calor. Repetir los pasos 6 al 8 hasta llegar al final de carril.

#### **Tercera Parte: Verificación de la ley del coseno de Lambert.**

1. Apagar la resistencia de la fuente de calor colocando la perilla en 0%
2. Desconectar la fuente de calor de la consola
3. Conectar la fuente de luz a la consola
4. Retirar el potenciómetro del soporte y en su lugar colocar el fotómetro cuidado que la pantalla de medición quede de frente a la fuente de luz y que quede alineada en cero grado según la graduación de la base del fotómetro y del soporte.

5. Colocar el fotómetro lo mas cerca posible de la fuente luminosa, de forma de poder realizar una lectura en el fotómetro y poder girar completamente la fuente de luz
6. Fijar la fuente de luz al 100% de su capacidad
7. Apagar la luz
8. Colocar la fuente luminosa con ángulo de incidencia de  $90^\circ$  respecto al fotómetro
9. Realizar la lectura de la intensidad de luz registrada
10. Variar el ángulo de incidencia con diferencia de  $10^\circ$  respecto a la lectura anterior hasta recorrer  $180^\circ$

#### D.- Cálculos

- Determinar los valores de emisividad superficial para las placas de diferentes acabados utilizando la ley de Stefan-Boltzman.
- Graficar la intensidad de la luz emitida por la fuente de luz contra el ángulo de incidencia para un radio de giro constante y verificar la ley del coseno de Lambert.
- Graficar la potencia de radiación de una fuente de calor contra la distancia y verificar que la potencia calórica es proporcional al cuadrado inverso de la distancia.

#### E.- Cuestionario

- 1.- Defina cada uno de los términos que aparecen en la ecuación la ecuación (1).
- 2.- ¿Cómo expresaría la ecuación (1) para cuerpos opacos y por qué?
- 3.- La absorción de radiación por un sólido opaco es un fenómeno superficial y no un fenómeno de volumen, ¿por qué?
- 4.- ¿El calor generado en la absorción fluye hacia el interior de la masa de un sólido opaco por radiación, conducción o convección? Explique.
- 5.- ¿De qué factores depende el coeficiente de reflexión de un sólido opaco?
- 6.- Existen dos tipos de reflexión: especular o regular y difusa. Defina cada uno de ellos.
- 7.- ¿Qué es un cuerpo gris?
- 8.- Enuncie la ley de Kirchoff.
- 9.- Explique el significado de los términos de la ecuación (2).
- 10.- Explique qué representa el poder emisivo.
- 11.- Defina cuerpo negro.
- 12.- Basándose en la definición de cuerpo negro y en la ley de Kirchoff demuestre que en el equilibrio térmico, la absorbencia y la emisividad de un cuerpo son iguales.
- 13.- Tomando en cuenta que el experimento no se realiza al vacío, modifique la ecuación (4). Analice

el significado de sus términos y exprese qué unidades tienen.

14.- Haga un análisis de la relación (5) y diga el significado de cada término.

15.- Explique el significado de los términos que aparecen en la ecuación (6).

16.- ¿Que parámetros incluye la constante K en la ecuación (7)?

17.- ¿En qué condiciones de procesos es importante considerar el calor por radiación?

18.- ¿Qué términos involucra la constante de la Ley del coseno de Lambert? ¿En qué forma se realiza el montaje experimental para considerar estos términos constantes?

19.- ¿Qué términos involucra la constante de la Ley del cuadrado inverso de la distancia? ¿En qué forma se realiza el montaje experimental para considerar estos términos constantes?

20.- A partir de la tabla 1, correspondiente a experimentos realizados con cada una de las tres placas, determine la emisividad respectiva de cada una de las placas, justificando su selección.

#### **F.- Bibliografía**

- 1.- Bird, R. B., W. E. Stewart y E. N. Lightfoot, “Fenómenos de Transporte”, Editorial Reverté S. A., Barcelona, 1975.
- 2.- Kreith F., “Principios de Transferencia de Calor”, 1<sup>ra</sup> edición, Herrero Hermanos Sucesores S. A., México, 1970.
- 3.- Ozisik, M. N., “Transferencia de Calor”, 1<sup>ra</sup> edición, McGraw-Hill Latinoamericana S. A., Bogotá, 1979.
- 4.- McCabe, W. L. y J. C. Smith, “Operaciones Básicas de Ingeniería Química”, Editorial Reverté S. A., Barcelona, Vol. I, 1975.
- 5.- Welty, J. R., C. E. Wicks y R. E. Wilson, “Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa”, 1<sup>ra</sup> edición, Editorial Limusa S. A., México, 1984.

## APENDICE A

### PROCEDIMIENTO BÁSICO PARA UTILIZAR UN EXTINTOR PÓRTATIL

(Tomado de la guía “Agentes Extinguidores y Extintores Portátiles”,  
realizada por el Lic. C/1° Guillermo García, miembro del  
Cuerpo de Bomberos Voluntarios de la USB)

El procedimiento básico en el uso de los extintores portátiles es el siguiente:

- 1.- Asegúrese que el extintor se encuentra en **buenas condiciones**, el precinto no está roto y la presión es la apropiada. Para los extintores de CO<sub>2</sub>, el peso es un indicador de que el mismo está lleno.
- 2.- Rompa el precinto y quite el anillo de seguridad. Si el extintor es de presión indirecta, percute el cilindro de gas, empujando la palanca hacia abajo.
- 3.- Realice una pequeña descarga del extintor frente a Ud., a fin de verificar si no tiene problemas el aparato.
- 4.- Dirija la boquilla del extintor **hacia la base de la llama, y con el viento a su favor**, dispare repetidas veces y de forma que cubra la mayor área del incendio, hasta que controle el mismo.
- 5.- Luego de terminar y verificar que no existen mas focos, **ventile el área** y recargue los extintores utilizados.
- 6.- Recuerde que el uso de extintores portátiles es **sólo para conatos de incendio**.

Es importante acotar que para utilizar correctamente el extintor además del procedimiento Ud. debe saber que tipo de material se incendia y si el agente extinguidor que está usando está diseñado para combatir este tipo de fuego. En la tabla A.1 se muestra de manera resumida los tipos de fuego, y en la tabla A.2 las características de los extintores.

Tabla A.1. Tipos de Fuego

TIPO DE FUEGO	DEFINICIÓN	EJEMPLOS
A	Es una combustión viva con llamas o una combustión lenta con brasas. Son fuegos de materiales combustibles sólidos.	Madera, textiles, papel, caucho y plásticos termoestables (se deforman por la acción de la temperatura)
B	Son los fuegos de líquidos inflamables y/o combustibles, gases o grasa y plásticos termoplásticos (se licúan por la acción de la temperatura).	Gasolina
C	Son los fuegos de origen eléctrico o donde estén involucrados aparatos eléctricos energizados y/o instalaciones eléctricas energizadas.	Una computadora encendida, una bomba enchufada.
D	Son los fuegos de metales combustibles	Sodio, magnesio, potasio, titanio, circonio, aluminio.

Tabla A.2. Características de los extintores portátiles.

AGENTE EXTINGUIDOR	TIPO DE FUEGO	COLOR DEL ENVASE	PRESIÓN (PSI)	OBSERVACIONES
Agua	A	Plateado	100-150	Boca de descarga fina (boquilla).
CO <sub>2</sub>	B-C	Rojo	800-900	Boca de descarga gruesa (tobera). Sin manómetro.
PQS (polvo químico seco)	A-B-C	Rojo	150-195	Dos tipos: presión directa o indirecta.

---

HALON

A-B-C

Rojo

150-195

Luego de su uso, convertir a  
PQS

---