



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

**CONSTRUCCIÓN DE UN NOMOGRAMA PARA EVALUAR LA TEMPERATURA DE LA  
PARED DEL TUBO INTERIOR, EN EL DISEÑO PRELIMINAR DE UN INTERCAMBIADOR DE  
CALOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS UTILIZANDO COMO FLUIDOS AGUA-AIRE**

**Karla María Cay López**

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, marzo de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONSTRUCCIÓN DE UN NOMOGRAMA PARA EVALUAR LA TEMPERATURA DE LA  
PARED DEL TUBO INTERIOR, EN EL DISEÑO PRELIMINAR DE UN INTERCAMBIADOR DE  
CALOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS UTILIZANDO COMO FLUIDOS AGUA-AIRE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**KARLA MARÍA CAY LÓPEZ**

ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, MARZO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. William Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADORA	Inga. Hilda Esperanza Palma
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**CONSTRUCCIÓN DE UN NOMOGRAMA PARA EVALUAR LA TEMPERATURA DE LA PARED DEL TUBO INTERIOR, EN EL DISEÑO PRELIMINAR DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS UTILIZANDO COMO FLUIDOS AGUA-AIRE**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 22 de noviembre de 2013.

**Karla María Cay López**

Guatemala 03 de febrero de 2015

Ingeniero  
V́ctor Manuel Monz3n Valdez  
Director  
Escuela de Ingenieŕa Qúmica  
Facultad de Ingenieŕa  
Presente

Ingeniero Monz3n:

Por este medio informo a usted que he revisado el Informe final de graduaci3n, titulado **"CONSTRUCCI3N DE UN NOMOGRAMA PARA EVALUAR LA TEMPERATURA DE LA PARED DEL TUBO INTERIOR, EN EL DISEÑO PRELIMINAR DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS CONC3NTRICOS UTILIZANDO COMO FLUIDOS AGUA-AIRE"** elaborado por la estudiante **Karla Maŕa Cay L3pez**, quien se identifica con el carne No. **200819163**, el cual he encontrado satisfactorio.

Atentamente.

  
Ing. Jorge Emilio Godínez  
Asesor del Trabajo de Graduaci3n

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus  
INGENIERO QÚMICO  
Colegiado 874



Guatemala, 19 de febrero de 2015.  
Ref. EIQ.TG-IF.012.2015.

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **159-2013** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Karla María Cay López**.  
Identificada con número de carné: **2008-19163**.  
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

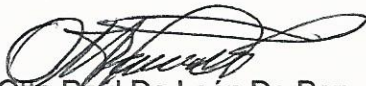
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

### CONSTRUCCIÓN DE UN NOMOGRAMA PARA EVALUAR LA TEMPERATURA DE LA PARED DEL TUBO INTERIOR, EN EL DISEÑO PRELIMINAR DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS UTILIZANDO COMO FLUIDOS AGUA-AIRE

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

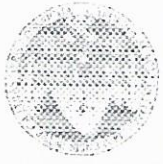
Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

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



C.c.: archivo



Ref.EIQU.TG.039.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **KARLA MARÍA CAY LÓPEZ** titulado: **"CONSTRUCCIÓN DE UN NOMOGRAMA PARA EVALUAR LA TEMPERATURA DE LA PARED DEL TUBO INTERIOR, EN EL DISEÑO PRELIMINAR DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS UTILIZANDO COMO FLUIDOS AGUA-AIRE"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*

*Manuel Monzón Valdez*

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
 DIRECTOR  
 Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, marzo 2015

Cc: Archivo  
 VMMV/ale






DTG. 127.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **CONSTRUCCIÓN DE UN NOMOGRAMA PARA EVALUAR LA TEMPERATURA DE LA PARED DEL TUBO INTERIOR, EN EL DISEÑO PRELIMINAR DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS UTILIZANDO COMO FLUIDOS AGUA-AIRE,** presentado por la estudiante universitaria: **Karla María Cay López,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 23 de marzo de 2015



/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por la vida, ya que me permitió llegar a esta etapa tan importante e inolvidable de mi vida.
- Mi papá** Carlos Cay, por su amor y apoyo durante todas las etapas de mi vida.
- Mi mamá** Rosa López, por su amor, sus consejos y por mostrarme que siempre hay una esperanza.
- Mi esposo** José Roberto Calderón, por todo el amor y dedicación, brindarme todo su apoyo para alcanzar esta meta.
- Mi hijo** Gilberto Gabriel Calderón, por toda la paciencia y amor. Eres mi gran inspiración hijito mío.
- Mi hermana** Andrea Cay, por su cariño y todo su apoyo incondicional.
- Mi hermano** Raúl Cay, por su cariño y la confianza depositada en mí; que todo lo que se quiere se logra con perseverancia.

**Mi familia**

Por acompañarme en cada momento de mi vida en las buenas y en las malas.

**Mi asesor**

Ing. Godínez, por compartir sus consejos y enseñanzas para realizar este trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por permitirme ser parte de esta casa de estudios, y por la exitosa culminación de la carrera.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme todas las herramientas necesarias durante mis años de estudios en la facultad.
<b>Escuela de Ingeniería Química</b>	Por la formación que me brindaron, porque hicieron de mí una persona nueva.
<b>Compañeros y amigos</b>	<p>Por llegar a ser parte de mi vida, porque cada uno de ustedes ha dejado una huella en mí. Por su amistad, cariño y la confianza que tuvieron en mí en todo momento.</p> <p>A ustedes queridos amigos: Víctor Ríos, Aurora Ortiz, María Guerra, María Menéndez, María Ponce, Marvin Vásquez, Julio Arriola, Zindy Domínguez, Mary Carrillo, Flor Flores, Patricia Díaz, Arturo Cabrera, Jeaffry Cheesman, Margarita Castellanos, Ligia Ulin, Jorge Gálvez, Luis Tejeda, Diego Simón, Karin Corazón, Eduardo González, Juan Segura, Karen Hernández e Izael Pott.</p>

## **Señoritas**

Por ser unas personas muy importante en mi vida, siempre las llevo en mi corazón. A ustedes mis niñas queridas; Analy Gamarro, Andrea Galindo, Miriam Álvarez, Jennifer Escobar, Yolanda Guzmán, Elena Oliva, Yazmin Ortiz, Angela Reynoso, Iliana García, Anahí Juárez, Sthepany Quiñonez y Shirley Alegría.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
Hipótesis .....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	XV
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Origen de la nomografía .....	1
1.2. Ejemplos de nomogramas utilizados en la ingeniería.....	2
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. ¿Qué es la nomografía? .....	3
2.2. Nomograma .....	3
2.3. Clases de nomogramas .....	3
2.3.1. Nomograma cartesiano .....	3
2.3.2. Nomograma de puntos alineados .....	4
2.3.3. Familia de ábacos.....	5
2.4. Uso de nomogramas.....	5
2.5. Transferencia de calor .....	6
2.5.1. Mecanismos de transferencia de calor .....	7
2.6. Perfiles de temperatura.....	8
2.6.1. Temperatura de la pared del tubo.....	9
2.7. Intercambiador de calor .....	9

2.7.1.	Clasificación de los intercambiadores de calor.....	10
2.7.2.	Tipos de intercambiadores de calor según su construcción y los más utilizados en la industria .....	10
2.7.2.1.	Intercambiador de calor de tubos concéntricos .....	11
2.7.2.2.	Intercambiador de calor de concha y tubos .....	12
2.7.3.	Aplicaciones de intercambiador de calor de concha y tubo, tubos concéntricos .....	13
2.8.	Números adimensionales .....	14
2.9.	Ecuaciones empíricas y correlaciones .....	14
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	17
3.1.	Variables.....	17
3.1.1.	Variables de control.....	17
3.1.2.	Listado de variables a manipular .....	18
3.2.	Delimitaciones del campo de estudio .....	18
3.2.1.	Área de investigación .....	18
3.2.2.	Línea de investigación.....	19
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	19
3.3.1.	Investigador .....	19
3.3.2.	Asesor .....	19
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	20
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa .....	20
3.5.1.	Técnica cualitativa.....	20
3.5.2.	Técnica cuantitativa.....	21
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	23
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	29

3.8.	Análisis estadístico .....	37
4.	RESULTADOS .....	39
4.1.	Instructivo para el manejo e interpretación del nomograma ....	40
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	43
	CONCLUSIONES .....	45
	RECOMENDACIONES.....	47
	BIBLIOGRAFÍA.....	49
	APÉNDICES .....	53





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Nomograma de Siggaard-Andersen.....	6
2.	Perfil de temperatura para un intercambiador de calor de tubos concéntricos .....	9
3.	Intercambiador de calor de tubos concéntricos .....	11
4.	Intercambiador de calor de concha y tubo .....	13
5.	Diagrama de Flujo diseño preliminar de investigación .....	21
6.	Diagrama de Flujo de la metodología de cálculo. ....	26
7.	Diagrama de Flujo para calcular la temperatura de pared del tubo interior a partir de los coeficientes convectivos .....	28
8.	Diagrama de Flujo de la construcción de la familia de ábacos.....	35
9.	Nomograma familia de ábacos para determinar $t_w$ en un IDC T-T con IPS de tubo exterior 2 y tubo interior $1 \frac{1}{4}$ y con IPS de tubo exterior de 3 y tubo interior 2.....	39
10.	Ejemplo del uso del nomograma .....	42

### TABLAS

I.	Clasificación de los intercambiadores de calor .....	10
II.	Conexiones típicas más utilizadas de los intercambiadores de tubos concéntricos .....	12
III.	Aplicaciones de distintos tipos de intercambiadores de calor .....	13
IV.	Variables de control.....	17
V.	Variables a manipular.....	18

VI.	Datos teóricos del vapor de agua .....	24
VII.	Datos teóricos del aire a 1 atmósfera de presión.....	24
VIII.	Conexiones más comunes para un intercambiador de calor de tubos concéntricos .....	25
IX.	Velocidades de los fluidos patrón y comparsa .....	25
X.	Localización de los datos teóricos del fluido comparsa (vapor de agua) .....	29
XI.	Localización de los datos teóricos del fluido patrón (aire).....	30
XII.	Selección del IDC .....	30
XIII.	Validez estadística de la familia de ábacos para el IDC con IPS tubo exterior 2 y tubo interior 1 ¼ .....	37
XIV.	Validez estadística de la familia de ábacos para el IDC con IPS tubo exterior 3 y tubo interior 2 .....	37
XV.	Interpretación de familia de ábacos para un IDC T-T con un IPS de tubo exterior 2 y tubo interior 1 ¼.....	40
XVI.	Interpretación de familia de ábacos para un IDC T-T con un IPS de tubo exterior 3 y tubo interior 2 .....	40

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$C_p$	Calor específico
$h_o$	Coeficiente de película externo
$h_{io}$	Coeficiente de película interno
$K$	Conductividad térmica
$\rho$	Densidad
$D_o$	Diámetro externo del ánulo
$D_i$	Diámetro interno del tubo
$F$	Factor de fricción (adimensional)
$M$	Interpolación
$L_c$	Longitud característica
$Nu_o$	Número de Nusselt (adimensional)
$Pr$	Número de Prandtl (adimensional)
$N_{Re}$	Número de Reynolds (adimensional)
$T_C$	Temperatura calórica exterior
$t_c$	Temperatura calórica interior
$t_w$	Temperatura de la pared del tubo
$v$	Velocidad del fluido
$\mu$	Viscosidad dinámica



## GLOSARIO

<b>Calor</b>	Energía que se puede transferir entre distintos sistemas siempre que exista una diferencia de temperatura.
<b>Ecuación</b>	Expresión matemática que contiene una o más variables.
<b>Fluido comparsa</b>	Fluido con el cual se pueden cambiar sus condiciones en el proceso.
<b>Fluido patrón</b>	Fluido de interés en el proceso a determinadas condiciones que son inamovibles.
<b>Intercambiador de calor</b>	Son aparatos de metal que ayudan a que exista un transferencia de calor entre fluidos a distintas temperaturas.
<b>IPS</b>	Instituto de Previsión Social.
<b>Iteración numérica</b>	Serie de pasos que son repetidos, donde se parte de un valor inicial supuesto.
<b>Nomograma</b>	Gráfico que permite obtener un valor puntual, sin realizar ningún tipo de cálculo, al conocer un conjunto de variables determinadas.

**Temperatura**

Es la cantidad medida de energía cinética promedio de una sustancia en un determinado estado de agregación.

## RESUMEN

Se construyó un nomograma de tipo familia de ábacos, debido a las distintas condiciones de trabajo utilizados. Se utilizaron dos tipos de intercambiadores de calor de tubos concéntricos nuevos sin aislamiento, los trabajados fueron con IPS de 2 para el tubo externo y  $1 \frac{1}{4}$  para el tubo interno, el otro de 3 para el tubo externo y 2 para el tubo interno.

Las condiciones de trabajo se dieron con la recolección, tabulación y procesamiento de los datos teóricos del aire y vapor de agua de una fuente confiable. Ya recolectados los datos se prosiguió a realizar un Diagrama de Flujo de la metodología de cálculo, para poder calcular y determinar cada uno de los números adimensionales necesarios, calcular los coeficientes convectivos y finalmente calcular la temperatura de pared.

Se llegó a obtener una serie de ábacos con las mismas tendencias, de la forma exponencial, a razón que el mismo fenómeno predominaba en ellos, al determinar una ecuación empírica, la cual fue encontrada al realizar una gráfica a partir de una serie de datos, obtener una tendencia y luego su correlación matemática.

Realizado el nomograma, se describe un instructivo fácil y práctico, del uso e interpretación del nomograma, con lo que se resalta que este fue diseñado con fines didácticos, se presenta la correlación matemática de los ábacos construidos para verificar la consistencia que los datos, con lo que se valida debido a que tienen una alta correlación del 0,999 en promedio para todos los ábacos graficados.





# OBJETIVOS

## General

Elaborar un nomograma para determinar la temperatura de la pared del tubo interno en un intercambiador de tubos concéntricos, con arreglo en contra corriente, utilizando los datos teóricos del fluido patrón aire y fluido comparsa agua en régimen turbulento.

## Específicos

1. Determinar la relación de las variables implicadas en el funcionamiento en el intercambiador de tubos concéntricos, con arreglo en contra corriente, utilizando los datos teóricos del fluido patrón aire y fluido comparsa agua en régimen turbulento.
2. Determinar el tipo de nomograma adecuado para las variables a graficar, además de ajustarse a la escala y rango de los datos.
3. Elaborar un nomograma con un programa de computadora específico para la construcción de gráficos multivariados.
4. Implementar un instructivo donde se describa el funcionamiento del nomograma.

## **Hipótesis**

### **Hipótesis de investigación**

Es posible determinar la temperatura del tubo interior de un intercambiador de calor de tubos concéntricos, mediante la relación de las variables propuestas para la construcción de un nomograma.

## INTRODUCCIÓN

La nomografía surgió muchos años atrás, en los últimos años ya no se construyen muchos nomogramas debido a que en la actualidad ya hay programas específicos para resolver problemas que implican varias variables.

La idea de construir un nomograma para evaluar la temperatura de pared, surge de la necesidad de cubrir una mayor cantidad de contenido en el curso de Transferencia de Calor (IQ-3), ya que muchas veces resolver un problema que pide este tipo de información se vuelve largo y tedioso, debido a que el estudiante debe poseer la información necesaria, un juicio lógico, conocimientos de matemática y tiempo suficiente para poder llegar a un resultado satisfactorio.

Como este nomograma es exclusivamente de uso didáctico, su interpretación debe ser precisa de parte de quien lo manipule.

Este nomograma es del tipo llamado familia de ábacos, en la que se representan los llamados ábacos dentro de un mismo plano, el cual muestra la información necesaria para determinar la temperatura de pared del tubo interior del intercambiador de calor en las condiciones de trabajo especificadas para los fluidos vapor de agua como comparsa y el aire como fluido patrón, que son de los fluidos más utilizados en la industria.

Los fluidos fueron seleccionados de esa manera debido que existen datos teóricos de ambos que son de fácil acceso.

Se realizó un diagrama de flujo de metodología de cálculo en la que se detalla paso a paso como fueron procesados cada uno de los datos, para determinar los números adimensionales. Y luego calcular los coeficientes convectivos necesarios tanto interno como externo, para finalmente calcular la temperatura de pared que se buscaba.

Se presenta un instructivo del manejo e interpretación del nomograma.

# 1. ANTECEDENTES

## 1.1. Origen de la nomografía

Esta “ciencia fue creada por el ingeniero francés Maurice d’Ocange en 1891, en la que ya es tomada como una ciencia independiente y homogénea, cuando d’Ocange, publicó en una única obra titulada *Nomographie (Les calculs usuels effectués au moyen des abanques. Essai d’une théorie générale)*”<sup>1</sup>

Los nomogramas al transcurrir el tiempo, fueron decayendo en desuso alrededor de los años 50 debido a la aparición de los métodos geométricos.

A pesar que la construcción de un nomograma requiere un trabajo laborioso, una vez ya construido, se podrá resolver cualquier problema simplemente al realizar una interpolación visual, aunque solamente se puede utilizar para una relación previamente determinada y para un determinado número de variables.

En la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala existe un único trabajo que trata sobre la construcción de un nomograma.

---

<sup>1</sup> ESCRIBANO, José. *La nomografía: una ciencia olvidada*. 42. p. Disponible en <http://www.sinewton.org/numeros/numeros/54/Articulo04.pdf>. Consulta: 11 de octubre de 2013

Marta Regina Dorigoni Véliz, de 1979, Investigaciones de factores en Guatemala para la construcción del nomograma de diámetro económico de tuberías.

Existen varias tesis relacionadas con el tema de intercambiadores de calor, entre estas:

Medios visuales como apoyo en el proceso de enseñanza-aprendizaje del curso transferencia de calor de Aura Estela Ruano de León, de 2005. De la Escuela de Ingeniería Química

Guía para el diseño de un intercambiador de calor de Fredy Mauricio Monroy Peralta, de 1999. De la Escuela de Mecánica, entre otros.

## **1.2. Ejemplos de nomogramas utilizados en la ingeniería**

La carta psicométrica, en la cual se muestra las distintas propiedades del aire, siendo la temperatura, presión volumen, entre otras, se utiliza para determinar, cómo varían dichas propiedades cuando varía la humedad del aire.

“La carta de Smith es un tipo de nomograma, usado en ingeniería eléctrica, que muestra cómo varía la impedancia compleja de una línea de transmisión a lo largo de su longitud”<sup>2</sup>.

También el conocido diagrama de Mollier, que muestra un resumen de las tablas de vapor del agua.

---

<sup>2</sup>MICRO GESTIÓN, Nomogramas Disponible en:  
<http://www.microgestion.com/index.php/mg-developers/item,/5-nomograma?p=213>. Consulta:  
11 de octubre de 2013.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. ¿Qué es la nomografía?**

Es el cálculo de un valor, o de varios valores, de una función determinada, mediante el uso de las gráficas.

### **2.2. Nomograma**

Carta que está conformada por líneas curvas o rectas en las cuales se puede realizar una aproximación de uno o más datos, sin que se necesite realizar algún cálculo.

Este tipo de grafica relaciona un conjunto de variables de entre dos a tres, o más variables implicadas en el fenómeno.

### **2.3. Clases de nomogramas**

Los nomogramas se clasifican por distintos criterios, entre los cuales están los nomogramas cartesianos, nomogramas de puntos alineados y familia de ábacos.

#### **2.3.1. Nomograma cartesiano**

“Tienen su origen en un conjunto de curvas de nivel, las cuales a su vez se originan en ecuaciones de la forma  $z = f(x, y)$ .”

En lugar de relacionar tres variables puede relacionar tres grupos de variables”<sup>3</sup>.

Para su elaboración se realiza como si se estuviera encontrando curvas de nivel, en las cuales se asignan una serie de valores constantes a una variable, que para esta situación tendrán la forma de  $z = f(x, y)$  en la cual será constante  $z$  ( $Constante = f(x, y)$ ).

### **2.3.2. Nomograma de puntos alineados**

Este tipo de nomograma se encuentra establecido por tres o más tipos distintos de escalas, las cuales pueden ser rectas o curvilíneas y/o una combinación de ellas. Se clasifican en:

Escalas en N

Escalas concurrentes

Escalas proporcionales

Dos escalas rectas y una curva

En red

Circulares

Combinada

---

<sup>3</sup>ZARATE, Fabrisio, *Ábacos o nomogramas*, Disponible en [http://matematicas.uis.edu.co/~integracion/rint-html/volumen/vol2\(1\)1983/vol2i83-artFZ.pdf](http://matematicas.uis.edu.co/~integracion/rint-html/volumen/vol2(1)1983/vol2i83-artFZ.pdf). Consulta: 10 de octubre de 2013.



### **2.3.3. Familia de ábacos**

Representación de una ecuación por infinitos ábacos, que van a depender de la forma que posee la ecuación esto va a definir el sistema representativo, así mismo de la clave geométrica que se deduce el valor a encontrar.

Se dice que varios ábacos que poseen la misma forma de la ecuación y grado que los define, son de la misma familia de ábacos y este tiene como objetivo primordial escoger un ábaco que pueda resolver la ecuación, dando un valor que sea fácil de encontrar al realizar cualquier tipo de trazo (recta a 90°, líneas a 45°).

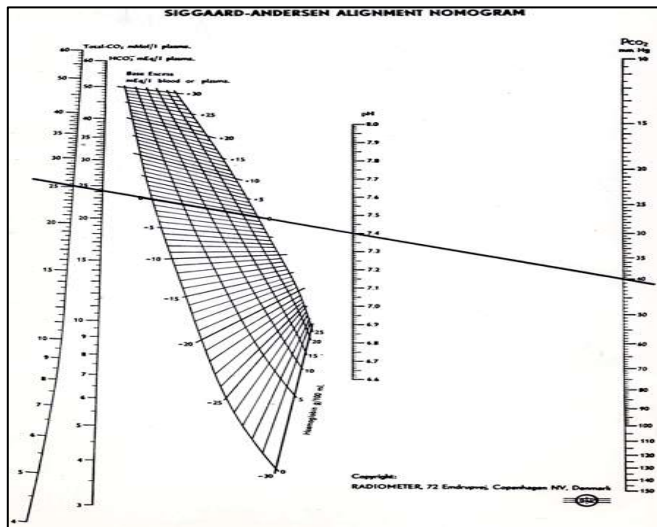
### **2.4. Uso de nomogramas**

“Al ser un nomograma, la representación gráfica de una ecuación de varias variables, ha de constar de tantos elementos gráficos, como variables tenga la ecuación. Estos elementos serán puntos o líneas, rectas o curvas, según los casos. Dados los valores de todas las variables menos una, el de esta última puede encontrarse por medio de algún recurso geométrico inmediato (que generalmente es el trazado de otra línea que pasa por ese punto).

Por tanto, el nomograma de una ecuación de dos variables ( $y = f(x)$ ) tendrá dos elementos gráficos, normalmente dos rectas graduadas, o escalas, dispuestas de tal modo que la determinación del valor de una de las variables (fijación de un punto de la línea) especifique el valor de la otra, la desconocida o

función. El nomograma de una ecuación de tres variables ( $z = f(x, y)$ ) constará normalmente de tres escalas y así sucesivamente.”<sup>4</sup>

Figura 1. **Nomograma de Siggaard-Andersen**



Fuente: Escuela de Medicina, Equilibrio acido-base en línea

[<http://escuela.med.puc.cl/publ/Aparatorespiratorio/06EQAcidoBase.html>] Consulta 27 de octubre de 2013.

## 2.5. Transferencia de calor

La transferencia de calor es una ciencia que trata de determinar la razón de transferencia de la energía en forma de calor.

<sup>4</sup> ZARATE, Fabrisio. *Ábacos o nomogramas*. Disponible en [http://matematicas.uis.edu.co/~integracion/rint-html/volumen/vol2\(1\)1983/vol2i83-artFZ.pdf](http://matematicas.uis.edu.co/~integracion/rint-html/volumen/vol2(1)1983/vol2i83-artFZ.pdf).

Consulta 10 de octubre de 2013.

El calor es la “forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura.”<sup>5</sup>

### **2.5.1. Mecanismos de transferencia de calor**

La transferencia de calor puede ocurrir por tres modos diferentes y/o combinados.

- Por conducción, que es la transferencia de energía en forma de calor entre partículas energéticas de un fluido hacia partículas con menor energía. Este mecanismo se puede dar en líquidos, sólidos y gases.
- Por radiación, es la energía que emite la materia en ondas electromagnéticas a su vez no requiere alguna presencia de algún medio.
- Por convección, es el mecanismo de transferencia de energía que se da entre el fluido y la superficie sólida. Debido a que es de mayor interés para la ingeniería se amplía más sobre este tema.

Se dará una transferencia de calor por convección dentro de una tubería al combinare un líquido-líquido o un líquido-gas, a su vez hay una transferencia conductiva.

Este fenómeno se encuentra regido por medio de la ecuación de la Ley de enfriamiento de Newton.

---

<sup>5</sup> CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. 12. p.

No importando si el flujo es laminar o turbulento este ejerce un efecto en el coeficiente de transferencia de calor  $h$ , que se le conoce como el coeficiente de película.

“Pues la mayor parte de la resistencia a la transferencia de calor está localizada en la película delgada cerca a la pared”<sup>6</sup>.

Las correlaciones para estimar el coeficiente de película  $h$ , son semiempíricas que van a depender de las propiedades del fluido, tipo, velocidad y diferencia entre las temperaturas.

El mecanismo de convección se clasifica en:

- Convección forzada : “el flujo se produce por diferencia de velocidades producidas por una bomba, un ventilador”<sup>7</sup>
- Convección natural: se debe al movimiento del fluido debido a sus diferencias de densidad.

## **2.6. Perfiles de temperatura**

La temperatura es una cantidad medida de energía cinética promedio de las moléculas de una sustancia en un determinado estado de agregación.

Un perfil de temperatura es una gráfica en la cual se muestra la relación temperatura-longitud, en la que se puede observar las temperaturas de entrada y salida de los dos fluidos involucrados y su recorrido a lo largo del intercambiador de calor.

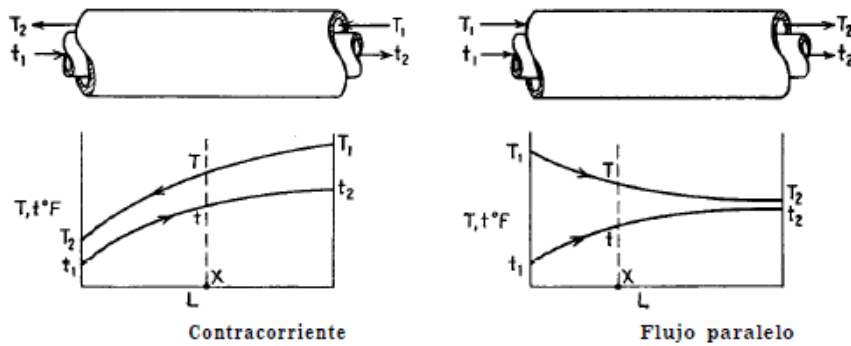
---

<sup>6</sup> Geankoplis, Cristian. *Procesos de transporte y Operaciones Unitarias*. p. 267.

<sup>7</sup> *Ibíd.*

Existen dos perfiles de temperatura más utilizados: el arreglo a contracorriente y el arreglo en paralelo.

Figura 2. **Perfil de temperatura para un intercambiador de calor de tubos concéntricos**



Fuente: KERN, Donald. Procesos de transferencia de calor. p. 122.

### 2.6.1. Temperatura de la pared del tubo

Esta temperatura puede ser calculada al conocer las temperaturas calóricas y los coeficientes convectivos son conocidos.

## 2.7. Intercambiador de calor

Es un aparato construido de una aleación de metales “que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan al mismo tiempo que se mezclen entre sí”<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 609.

A su vez este aparato debe seguir la ley de la conservación de la energía.

### 2.7.1. Clasificación de los intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se clasifican a distintos criterios, uno de ellos es el que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla I. Clasificación de los intercambiadores de calor

De acuerdo	Clasificación
Al proceso de transferencia	<ul style="list-style-type: none"><li>• De contacto directo</li><li>• De contacto indirecto</li></ul>
Al mecanismo de transferencia de calor	<ul style="list-style-type: none"><li>• Convección de una sola fase</li><li>• Convección con un cambio de fase</li><li>• Convección y radiación</li></ul>
A la disposición de los fluidos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Contracorriente</li><li>• Paralelo</li></ul>

Fuente: elaboración propia, basado en GONZALES, Rosinda. Guía *Intercambiadores de calor*.

<http://www.slideshare.net/yumardiaz/intercambiadores-decalortiposgeneralesyaplicaciones>,

Consulta: 1 de octubre de 2013.

### 2.7.2. Tipos de intercambiadores de calor según su construcción y los más utilizados en la industria

Existe una gran variedad de intercambiadores de calor. Se limitará a los intercambiadores más comunes en la Ingeniería Química.

### 2.7.2.1. Intercambiador de calor de tubos concéntricos

A este tipo de intercambiador de calor se le conoce también como intercambiador de doble tubo.

“Este es uno de los diseños más simples y consiste básicamente de dos tubos concéntricos, en donde una corriente circula por dentro del tubo interior, mientras que la otra circula por el ánulo formado entre los tubos”<sup>9</sup>.

Partes que componen un intercambiador de tubos concéntricos:

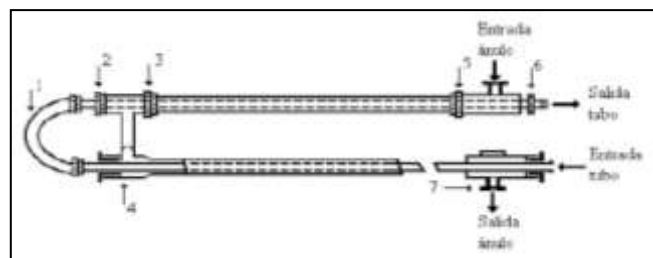
Dos juegos de tubos concéntricos

Dos T conectoras

Un codo en U

Un cabezal de retorno

Figura 3. Intercambiador de calor de tubos concéntricos



Fuente: GONZALES, Rosinda. *Guía Intercambiadores de calor: Tipos generales y aplicaciones*.

<http://www.slideshare.net/yumardiaz/intercambiadores-decalortiposgeneralesyaplicaciones>.

Consulta: 1 de octubre de 2013.

<sup>9</sup>GONZALES, Rosinda. *Guía Intercambiadores de calor: Tipos generales y aplicaciones*.

<http://www.slideshare.net/yumardiaz/intercambiadores-decalortiposgeneralesyaplicaciones>.

Consulta: 1 de octubre de 2013.

A continuación se detallan las conexiones más conocidas para los intercambiadores de calor de tubos concéntricos.

Tabla II. **Conexiones típicas más utilizadas de los intercambiadores de tubos concéntricos**

Tubo exterior, IPS	Tubo interior, IPS
2	1 ¼
2 ½	1 ¼
3	2
4	3

Fuente: KERN, Donald, *Procesos de transferencia de calor*. p. 112.

### **2.7.2.2. Intercambiador de calor de concha y tubos**

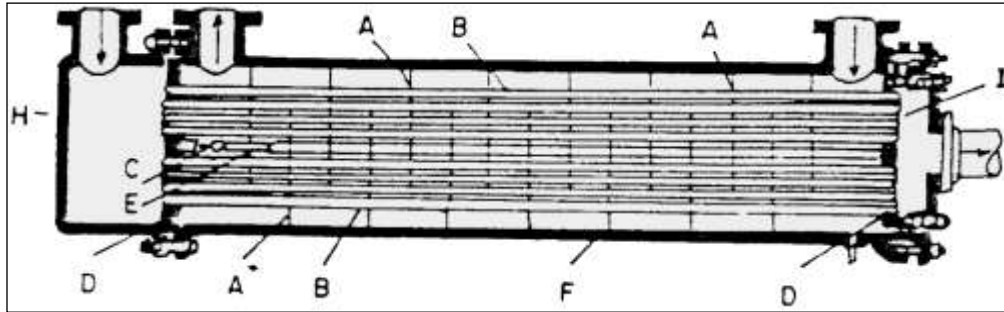
Este intercambiador está formado por un casco o carcasa que en su interior se encuentra repleto de tubos que tienen sus ejes paralelos a la carcasa.

Partes de un intercambiador de calor de concha y tubo:

- A. Deflectores
- B. Tubos
- C. Varilla guía
- D. Soporte circular
- E. Espaciador de tubos
- F. Carcasa
- G. Cabezote
- H. Cabezal



Figura 4. **Intercambiador de calor de concha y tubo**



Fuente: BOHÓRQUEZ, Hernán. *Maquinaria y equipos de alimentos*.

[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccion\\_43\\_intercambiadores\\_de\\_tubo\\_y\\_carcaza.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccion_43_intercambiadores_de_tubo_y_carcaza.html). Consulta: 23 de octubre de 2013.

### 2.7.3. **Aplicaciones de intercambiador de calor de concha y tubo, tubos concéntricos**

Al ser estos dos tipos de intercambiadores de calor los más utilizados y conocidos, se describen sus aplicaciones más comunes en la siguiente tabla.

Tabla III. **Aplicaciones de distintos tipos de intercambiadores de calor**

Tipo de intercambiador de calor	Aplicaciones
Coraza y tubo	Calentamiento o enfriamiento de una solución.
Tubos concéntricos	Calentamiento o enfriamiento de una solución.

Fuente: elaboración propia.

## 2.8. Números adimensionales

En la aplicación de cálculos para determinar ciertos parámetros en flujo turbulento en tubos se utilizan los siguientes números adimensionales:

- Número de Reynolds: “es la relación de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido a la fuerza viscosa”.<sup>10</sup>  
Si  $N_R < 2000$ , el flujo es laminar  
 $N_R > 4000$ , el flujo es turbulento
- Número de Prandtl: “es el espesor relativo de la capa límite de velocidad y térmica.”<sup>11</sup>  
El rango del número de Prandtl para los fluidos  $< 0.01$  hasta más de 100 000.
- Número de Nusselt: es la relación entre la conductividad térmica del fluido, longitud característica del tubo y el coeficiente de transferencia de calor.

## 2.9. Ecuaciones empíricas y correlaciones

A lo largo del tiempo, los distintos investigadores han desarrollado varias ecuaciones empíricas o correlaciones enfocadas al flujo turbulento en tubos, debido, a que este tipo de flujo es el más utilizado por poseer los coeficientes de calor altos.

---

<sup>10</sup> Mott Robert, *Mecánica del calor*. p. 231.

<sup>11</sup> CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 422.

Entre las más comunes se tienen:

- La primera ecuación de Petukhov, utilizada en tubos lisos para calcular el factor de fricción (1970).
- Analogía de Chilton-Colburn, esta incluye el factor de fricción para calcular en número de Nuselt.
- Ecuación de Colburn, utilizada cuando ya el fluido está desarrollado completamente en régimen turbulento.
- Ecuación de Sieder y Tate, esta viene dada de la diferencia de temperatura entre la superficie de la pared del tubo y la temperatura del fluido, utilizando de base la temperatura media del fluido (1936).
- Segunda ecuación de Petukhov, ecuación con un 10 % de error, relaciona el número de Nusselt y el factor de fricción.
- Ecuación de Gnielinski, esta modifica a la segunda ecuación de Petukhov, donde el factor de fricción se calcula a partir de la primera ecuación de Petukhov (1976).



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

La determinación de los factores que tienen influencia en la temperatura de la pared interna del tubo, va a depender de la velocidad del fluido, diámetro interno del tubo y de las condiciones ambientales donde se trabaje.

##### 3.1.1. Variables de control

Estas variables son características de los fluidos a trabajar que van a depender de las condiciones de trabajo, como se detallan a continuación.

Tabla IV. Variables de control

#	Variable	Dimensional	Factor potencial de estudio		Factor perturbador	
			Independiente	Dependiente	Controlable	No Controlable
<b>Análisis de Datos teóricos</b>						
1	Temperatura de entrada	°C	X		X	
2	Velocidad del fluido	m/s	X		X	
3	Viscosidad dinámica	kg/m*s		X		X
4	Calor específico	kJ/kg*K		X		X
5	Número de Reynolds	adm		X		X
6	Número de Prandtl	adm		X		X
7	Factor de Fricción	adm		X		X
8	Número de Nusselt	adm		X		X

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2. Listado de variables a manipular

Las variables a manipular son las que podemos cambiar para el parámetro de un diseño previo.

Tabla V. Variables a manipular

No.	Variable	Dimensional	Rango de variación
1	Velocidad del fluido patrón y comparsa	m/s	$2 < v < 5$
2	Diámetro interno y externo del intercambiador de calor	m	$0.03175 < di < 0.0508$ $0.0508 < de > 0.0762$

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitaciones del campo de estudio

El campo de estudio se limita a los intercambiadores de calor de tubos concéntricos, utilizados en la industria y con propósito de estudio de la carrera de Ingeniería Química, principalmente para los estudiantes del curso de Transferencia de Calor (IQ-3).

#### 3.2.1. Área de investigación

El campo de estudio se limita a los intercambiadores de calor de tubos concéntricos, utilizando el fluido patrón aire y fluido comparsa agua, que son los dos fluidos más utilizados en la industria.

### **3.2.2. Línea de investigación**

La línea de investigación es la evolución de los datos teóricos y como se relacionan entre ellos para la elaboración de un nomograma útil, para la obtención de datos de respuesta para un intercambiador de calor de tubos concéntricos en un sistema vapor de agua-aire.

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

Con la finalidad de aportar nuevas herramientas para el aprendizaje del curso de transferencia de calor, se pretende construir un nomograma que relacione distintas variables que faciliten una serie de cálculos para ciertas condiciones en un intercambiador de calor de tubos concéntricos.

#### **3.3.1. Investigador**

Karla María Cay López encargada de desarrollar el trabajo de investigación, análisis de datos, construcción de gráficos y responsable de la información obtenida para el trabajo de investigación.

#### **3.3.2. Asesor**

Ingeniero químico Jorge Emilio Godínez Lemus, responsable del asesoramiento y supervisión del trabajo de investigación. Por medio de la revisión y aportación de ideas para la realización del trabajo de investigación.

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

La realización del proyecto es netamente teórico, los materiales disponibles a utilizar son:

- Libros de transferencia de calor de diversos autores.
- Libros de matemáticas de diversos autores.
- Libros de flujo de fluidos de diversos autores.
- Libros de estadística para ingeniería de diversos autores.
- Equipo de computo.
- Programas de cómputo para analizar datos y realicen graficas.
- Artículos disponibles en internet sobre intercambiadores de calor y temas a fin.

### **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

El trabajo experimental se divide en tres partes las cuales son: obtención de datos teóricos de fuentes confiables de los fluidos vapor de agua-aire a diferentes condiciones; el manejo de datos para la obtención de resultados y la elaboración de un nomograma congruente a los datos.

#### **3.5.1. Técnica cualitativa**

Para el siguiente trabajo de investigación no se tiene aplicación de una técnica cualitativa, sin embargo, se juzgará el previo resultado del nomograma de acuerdo a cualidades estéticas y armonización de datos.

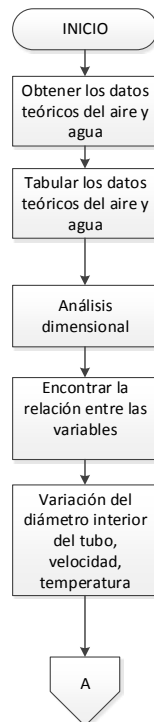


### 3.5.2. Técnica cuantitativa

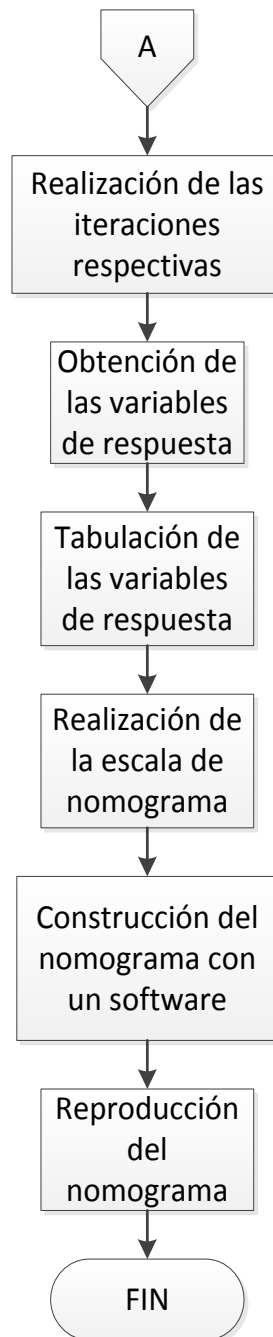
Como no se realiza una experimentación, solamente se utilizan datos teóricos obtenidos de las literaturas disponibles. Con base en esos datos se propondrán diversas relaciones entre las variables que son manipuladas en un intercambiador de calor, utilizando las correlaciones propuestas por distintos autores.

Como lo que se requiere encontrar es la temperatura de la pared del tubo interior para así poder obtener las diversas propiedades del fluido a esa temperatura, se realizará una serie de iteraciones en las cuales se utilizarán diversos parámetros en los que se puede variar el diámetro interior del tubo, la velocidad del fluido y la temperatura.

Figura 5. Diagrama de flujo diseño preliminar de investigación



Continuación de la figura 5.



Fuente: elaboración propia.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

La recolección consistió en tabular los datos teóricos del vapor de agua y aire, se recolectaron únicamente los datos teóricos de interés con rangos específicos de temperatura para ambos fluidos.

La relación entre las variables encontradas que pueden ser manipuladas son las velocidades de los fluidos y las temperaturas con que se trabaja; por lo que se tabuló la información sobre los intercambiadores de calor de tubos concéntricos, en sus conexiones más típicas utilizadas en IPS, debido a que estos datos son en pulgadas, para la realización de los cálculos se utilizó la conversión en metros.

Las velocidades tabuladas son las más comunes para estos fluidos, tomando en cuenta que ambos fluidos se encuentran a velocidades distintas y constantes a lo largo de la trayectoria.

Finalmente se detallan diagramas de flujo de la metodología de cálculo, para la obtención de las variables de respuesta necesarias (números adimensionales) como sus respectivos coeficientes convectivos internos y externos, para encontrar la temperatura de pared, para las distintas condiciones de trabajo en el rango de temperaturas especificado y velocidades.

Se utilizaron dos conexiones de IPS, para los intercambiadores de calor, siendo estos: las conexiones de tubo exterior 2 con tubo interior  $1 \frac{1}{4}$  y de tubo exterior 3 con tubo interior 2.

Tabla VI. **Datos teóricos del vapor de agua**

Temperatura (°C)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.K)	Viscosidad dinámica (kg(.s)	Conductividad térmica (kW/mK)	Pr
50	0,6794	1,874	0,00001078	0,02032	0,9944
75	0,6339	1,880.5	0,000011715	0,022305	0,9887
100	0,5884	1,887	0,00001265	0,02429	0,983
125	0,55365	1,897.5	0,00001365	0,02645	0,9771
150	0,5189	1,908	0,00001465	0,02861	0,9712

Fuente: CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 862.

Tabla VII. **Datos teóricos del aire a 1 atmósfera de presión**

Temperatura (°C)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (J/kg.K)	Viscosidad dinámica (kg(.s)	Conductividad térmica (kW/mK)	Pr
15	1,225	1,007	0,00001802	0,02364	0,7323
20	1,204	1,007	0,00001825	0,02401	0,7309
25	1,184	1,007	0,00001849	0,02439	0,7296
30	1,164	1,007	0,00001872	0,02476	0,7282
35	1,145	1,007	0,00001895	0,02514	0,7268
40	1,127	1,007	0,00001918	0,02551	0,7255

Fuente: CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 860.

Tabla VIII. **Conexiones más comunes para un intercambiador de calor de tubos concéntricos**

Tubo exterior, IPS	Tubo interior, IPS
2	1 ¼
2 ½	1 ¼
3	2

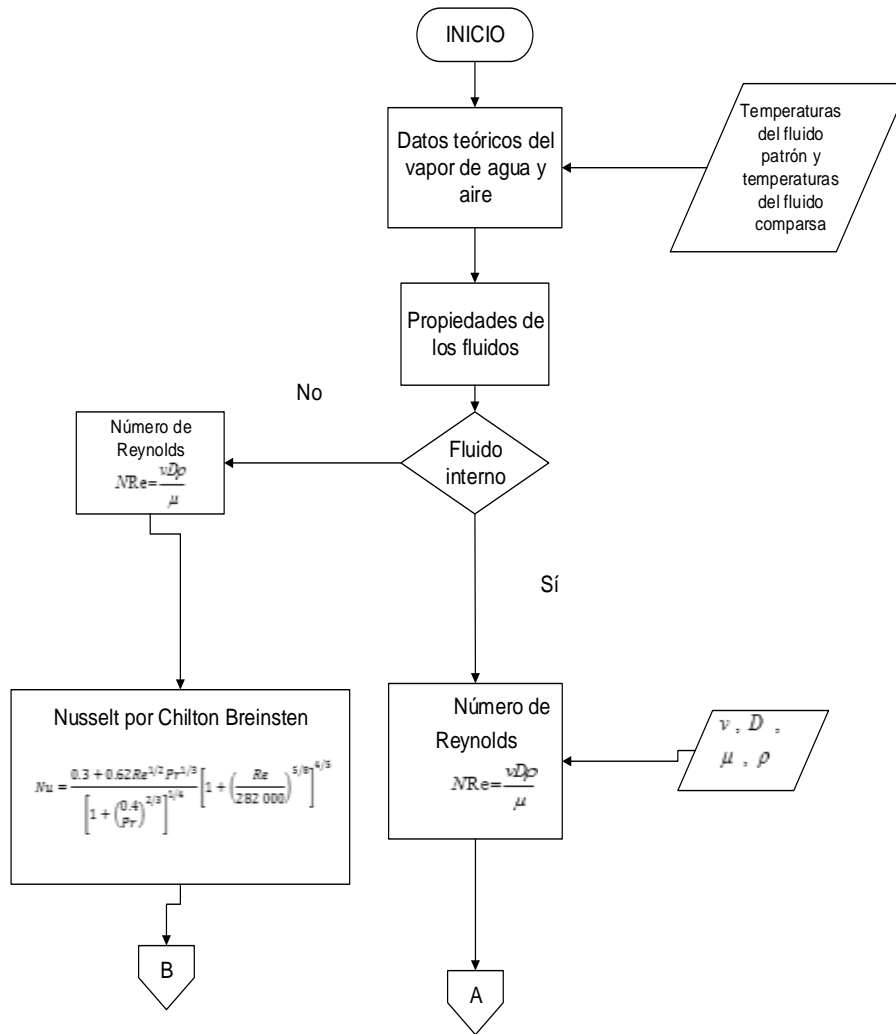
Fuente: KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. p. 112.

Tabla IX. **Velocidades de los fluidos patrón y comparsa**

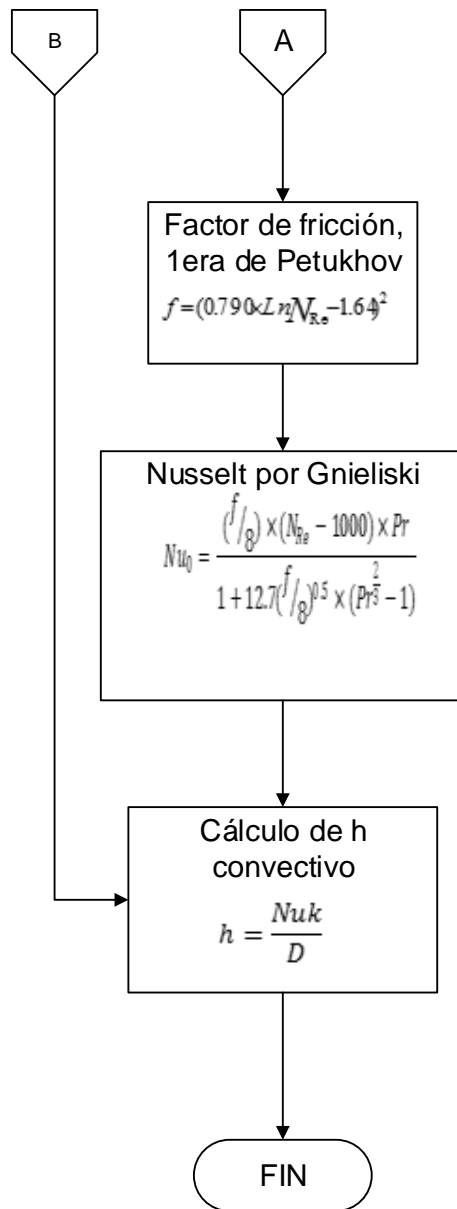
Fluido patrón (m/s)	Fluido comparsa (m/s)
2,5	Con: 2 3,5 5 3,75
3,5	Con: 3 4 2,5 4,5

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Diagrama de Flujo de la metodología de cálculo



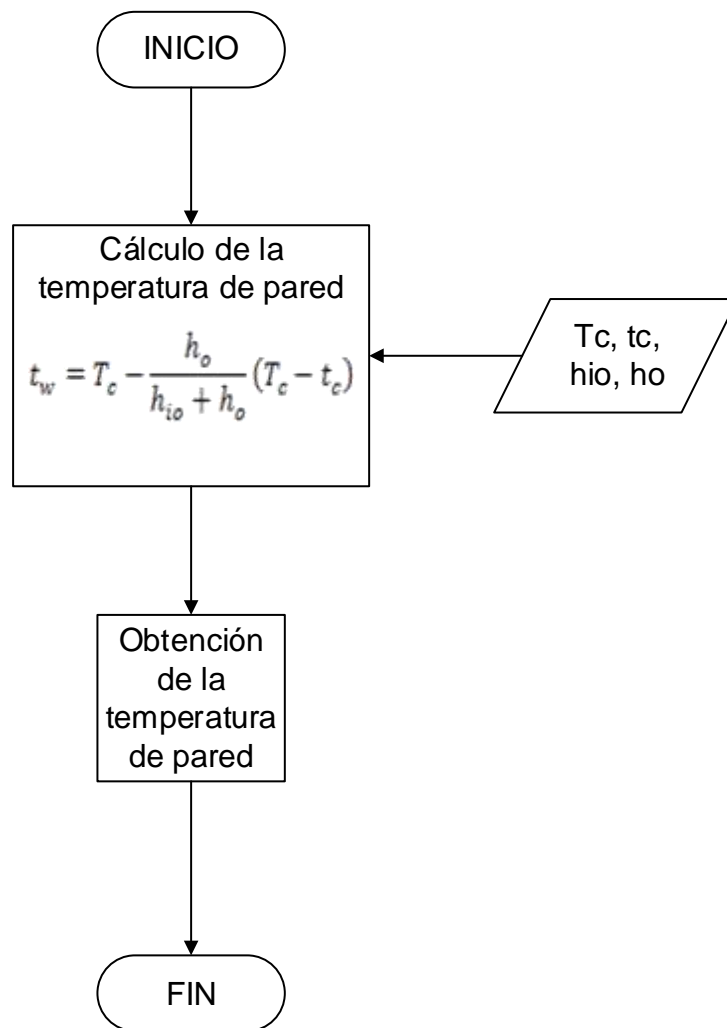
Continuación de la figura 6.



Fuente: elaboración propia.

A partir del Diagrama de Flujo anterior se tabularon los datos obtenidos de los coeficientes convectivos internos y externos, para proseguir a calcular la temperatura de pared del tubo con la ecuación presentada por Donalds Kern en del libro Transferencia de calor.

Figura 7. **Diagrama de Flujo para calcular la temperatura de pared del tubo interior a partir de los coeficientes convectivos**



Fuente: elaboración propia.



### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los datos teóricos del vapor de agua y el aire se tabularon, ordenaron y procesaron de acuerdo al Diagrama de Flujo anterior. A continuación se detalla una corrida para determinar la temperatura de pared del tubo.

Procesamiento de la información

Pasos a seguir:

- Localizar los datos teóricos de los dos fluidos

Tabla X. **Localización de los datos teóricos del fluido comparsa (vapor de agua)**

Temperatura (°C)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.K)	Viscosidad dinámica (kg(.s)	Conductividad térmica (kW/mK)	Pr
50	0,6794	1,874	0,00001078	0,02032	0,9944
75	0,6339	1,880.5	0,000011715	0,022305	0,9887
100	0,5884	1,887	0,00001265	0,02429	0,983
125	0,55365	1,897.5	0,00001365	0,02645	0,9771
150	0,5189	1,908	0,00001465	0,02861	0,9712

Fuente: CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 862.

Tabla XI. **Localización de los datos teóricos del fluido patrón (aire)**

Temperatura (°C)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (J/kg.K)	Viscosidad dinámica (kg(.s)	Conductividad térmica (kW/mK)	Pr
15	1,225	1,007	0,00001802	0,02364	0,7323
20	1,204	1,007	0,00001825	0,02401	0,7309
25	1,184	1,007	0,00001849	0,02439	0,7296
30	1,164	1,007	0,00001872	0,02476	0,7282
35	1,145	1,007	0,00001895	0,02514	0,7268
40	1,127	1,007	0,00001918	0,02551	0,7255

Fuente: CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 867.

- Selección del tamaño de los diámetros de los tubos y velocidades. Se trabajó primeramente un IDC, con IPS con diámetro interior 2 y diámetro exterior 1 ¼, debido a que estas medidas son pulgadas se realiza la conversión a metros; las velocidades se tomaron al azar para realizar los cálculos.

Tabla XII. **Selección del IDC**

Di (m)	0,03175
De (m)	0,0508
V (m/s)	2
V <sub>2</sub> (m/s)	3

Fuente: elaboración propia.

Cálculos para el fluido interno:

- Con base a los datos anteriores, se calcula el número de Reynolds
  - Para el fluido comparsa (vapor de agua) interno

$$N_{Re} = \frac{vLc}{\nu} = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Ecuación 1

Donde:

$N_{Re}$  = Número de Reynolds (adimensional)

$v$  = Velocidad del fluido (m/s<sup>2</sup>)

$Lc$ =Longitud característica (m)

$\nu$  = Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

$\rho$ = Densidad (kg/m<sup>3</sup>)

$D$ = Diámetro interno del tubo (m)

$\mu$ = Viscosidad dinámica (kg/m\*s)

Conociendo los valores adecuados se procede a realizar la sustitución correspondiente en la ecuación Núm.1

$$N_{Re} = \frac{\left(\frac{0,6339\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)\left(\frac{2,5\text{m}}{\text{s}}\right)(0,003175\text{m})}{0,000011715\text{m}^2/\text{s}}$$

$$N_{Re} = 4\,294,99$$

- Cálculo del factor de fricción en el flujo turbulento, primera ecuación de Petukhov

$$f = (0,790\text{Ln}N_{Re} - 1,64)^{-2}$$

Ecuación 2

Donde:

$f$  = Factor de fricción (adimensional)

$N_{Re}$  = Número de Reynolds (adimensional)

Conociendo los valores adecuados se procede a realizar la sustitución correspondiente en la ecuación Núm. 2

$$f = (0,790 \ln 4\,294,99 - 1,64)^{-2}$$

$$f = 0,04050$$

- Cálculo de Nusselt, por medio de la ecuación de Gnieliski

$$Nu_0 = \frac{(f/g) \times (N_{Re} - 1000) \times Pr}{1 + 12,7(f/g)^{0,5} \times (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$Nu_0$  = Número de Nusselt (adimensional)

$f$  = Factor de fricción (adimensional)

$N_{Re}$  = Número de Reynolds (adimensional)

$Pr$  = Número de Prandtl (adimensional)

Siempre y cuando se cumpla

$$\left( \frac{0,5 \leq Pr \leq 2000}{3 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6} \right)$$

Conociendo los valores adecuados se procede a realizar la sustitución correspondiente en la ecuación Núm. 3

$$Nu_0 = \frac{(f/g) \times (4\,294,99 - 1000) \times 0,99}{1 + 12,7(0,04050/g)^{0,5} \times (0,99^{\frac{2}{3}} - 1)}$$

$$Nu_0 = 16,6092$$

- Cálculo del  $h$  convectivo interno

$$h = \frac{Nu k}{D}$$

Ecuación 4

Donde:

$Nu$  = Número de Nusselt (adimensional)

$k$  = Conductividad térmica (W/m\*K)

$D$  = Diámetro interno (m)

Conociendo los valores adecuados se procede a realizar la sustitución correspondiente en la ecuación Núm. 4

$$h = \frac{16,6091 \times 0,022305 \text{W/mK}}{0,03175 \text{m}}$$

$$h = 11,6682 \text{W/m}^2 \times \text{K}$$

Con el procedimiento anterior utilizado se calcularon todos los  $h$  convectivos internos, para las dos configuraciones de los intercambiadores de calor de tubos concéntricos.

Cálculos para el fluido externo (aire):

- Cálculo del número de Reynolds

$$N_{Re} = \frac{vLc}{\nu} = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Ecuación 5

Conociendo los valores adecuados se procede a realizar la sustitución correspondiente en la ecuación Núm. 1

$$N_{Re} = \frac{\left(\frac{1,225 \text{Kg}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{2,5 \text{m}}{\text{s}}\right) (0,0508 \text{m})}{0,00001802 \text{m}^2/\text{s}}$$

$$N_{Re} = 6\,906,7702$$

- Cálculo del número de Nusselt por medio de la ecuación de Chilton Breinsten

$$Nu = \frac{0.3 + 0.62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282\,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

Ecuación 6

Donde:

Pr= Número de Prandtl (adimensional)

Re = Número de Reynolds (adimensional)

Conociendo los valores adecuados se procede a realizar la sustitución correspondiente en la ecuación Núm. 5

$$Nu = \frac{0,3 + 0,62(6\,906,77)^{1/2}(0,73)^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{0,73}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{6\,906,77}{282\,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

$$Nu = 43,5915$$

- Cálculo del h convectivo interno

$$h = \frac{Nuk}{D}$$

Ecuación 7

Donde

D= diámetro externo (m)

Conociendo los valores adecuados se procede a realizar la sustitución correspondiente en la ecuación Núm. 4

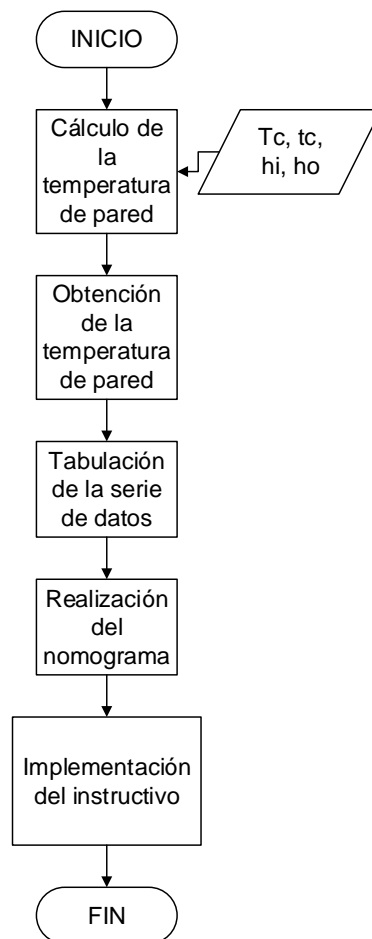
$$h = \frac{43,5915 \times 0,02401\text{W/mK}}{0,0508\text{m}}$$

$$h = 20,6030\text{W/m}^2 \times \text{K}$$

Con el procedimiento anterior se calcularon todos los  $h$  convectivos externos para las dos configuraciones de los intercambiadores de calor de tubos concéntricos.

Finalmente al obtener todos los  $h$  convectivos internos y externos se tabularon en tablas (anexos 6 al 13), para posteriormente realizar los cálculos de la temperatura de pared del tubo.

Figura 8. **Diagrama de flujo de la construcción de la familia de ábacos**



Fuente: elaboración propia.

Cálculo de la temperatura de pared, primera corrida, a partir del diagrama anterior.

- Conociendo los valores de  $T_c$ ,  $t_c$ ,  $h_i$ ,  $h_o$ , se prosiguió a calcular la temperatura de pared a partir de la siguiente ecuación.

$$t_w = T_c - \frac{h_o}{h_{io} + h_o} (T_c - t_c) \quad \text{Ecuación Núm. 7}$$

Donde:

$T_c$  = temperatura calórica exterior ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_c$  = temperatura calórica interior ( $^{\circ}\text{C}$ )

$h_o$  = coeficiente de película externo ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

$h_{io}$  = coeficiente de película interno ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

Conociendo los valores adecuados se procede a realizar la sustitución correspondiente en la ecuación Núm. 7.

$$t_w = 15^{\circ}\text{C} - \frac{\frac{20,6329\text{W}}{\text{m}^2} \times \text{K}}{\frac{11,6682\text{W}}{\text{m}^2} \times \text{K} + \frac{20,6329\text{W}}{\text{m}^2} \times \text{K}} (15^{\circ}\text{C} - 75^{\circ}\text{C})$$
$$t_w = 53,32^{\circ}\text{C}$$

De esta manera se determinó cada una de las temperaturas de pared, luego de encontrar todas las temperaturas se tabularon (anexos 6 al 13), y a partir de ello se realizó el nomograma.



### 3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico que se muestra es la consistencia que poseen los datos entre sí, refiriéndose a la familia de ábacos graficada en la sección de resultados. Como la correlación es de 0,999 promedio para los datos, se aceptan estos valores de la temperatura de pared como aceptables, aclarando que es solo para el rango de trabajo especificado a su vez única y exclusivamente para estos fluidos.

Tabla XIII. **Validez estadística de la familia de ábacos para el IDC con IPS tubo exterior 2 y tubo interior 1 ¼**

Temperatura (°C)	Ecuación	Correlación matemática	Intervalo de validez
75	$tw=48,648e^{0,0062Tc}$	0,9995	15 °C - 40 °C
100	$tw=72,438e^{0,0035Tc}$	0,9999	15 °C - 40 °C
125	$tw=96,63e^{0,0022Tc}$	1	15 °C - 40 °C
150	$tw=113,69e^{0,002Tc}$	1	15 °C - 40 °C

Fuente: elaboración propia, basado en tabla XV.

Tabla XIV. **Validez estadística de la familia de ábacos para el IDC con IPS tubo exterior 3 y tubo interior 2**

Temperatura (°C)	Ecuación	Correlación matemática	Intervalo de validez
75 (2)	$tw=45,24e^{0,0073Tc}$	0,9994	15 °C - 40 °C
100 (2)	$tw=62,87e^{0,0051Tc}$	0,9997	15 °C - 40 °C
125 (2)	$tw= 83,40e^{0,0036Tc}$	0,9999	15 °C - 40 °C
150 (2)	$tw= 93,467e^{0,0036Tc}$	0,9999	15 °C - 40 °C

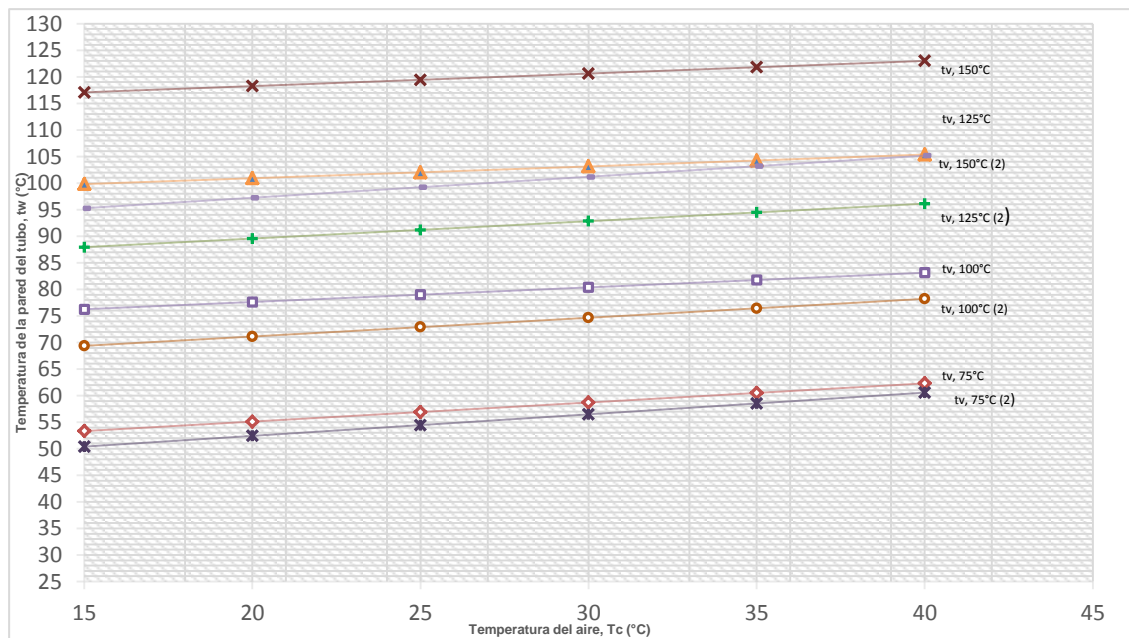
Fuente: elaboración propia, basado en tabla XVI.



## 4. RESULTADOS

A continuación se presenta el nomograma propuesto, utilizando las condiciones de trabajo descritas en las tablas XV y XVI, con el manual de uso y manejo del nomograma como resultados finales.

Figura 9. **Nomograma familia de ábacos para determinar  $t_w$  en un IDC T-T con IPS de tubo exterior 2 y tubo interior 1 ¼ y con IPS de tubo exterior de 3 y tubo interior 2**



Fuente: elaboración propia.

Nota: ver nomograma en tamaño doble carta en anexo 14 y su respectiva clave.

Tabla XV. Interpretación de familia de ábacos para un IDC T-T con un IPS de tubo exterior 2 y tubo interior 1 ¼

Temperatura (°C)	Diámetro interior (m.)	Diámetro exterior (m)	Velocidad patrón (m/s)	Velocidad Comparsa (m/s)	Ecuación	Correlación
75	0,03175	0,0508	2,5	2	$t_w=48,648e^{0,00621c}$	0,9995
100	0,03175	0,0508	2,5	3,5	$t_w=72,438e^{0,00351c}$	0,9999
125	0,03175	0,0508	2,5	5	$t_w=96,63e^{0,00221c}$	1
150	0,03175	0,0508	2,5	3,75	$t_w=113,69e^{0,0021c}$	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Interpretación de familia de ábacos para un IDC T-T con un IPS de tubo exterior 3 y tubo interior 2

Temperatura (°C)	Diámetro interior (m)	Diámetro exterior (m)	Velocidad patrón (m/s)	Velocidad comparsa (m/s)	Ecuación	Correlación
75 (2)	0,0508	0,0762	3,5	3	$t_w=45,24e^{0,00731c}$	0,9994
100 (2)	0,0508	0,0762	3,5	4	$t_w=64,602e^{0,0041c}$	0,9999
125 (2)	0,0508	0,0762	3,5	4,5	$t_w= 83,40e^{0,00361c}$	0,9999
150 (2)	0,0508	0,0762	3,5	2,5	$t_w= 89,848e^{0,0041c}$	0,9999

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1. Instructivo para el manejo e interpretación del nomograma

Nomograma familia de ábacos para determinar  $t_w$  en un IDC T-T con IPS de tubo exterior 2 y tubo interior 1 ¼ y con IPS de tubo exterior de 3 y tubo interior 2.

Pasos para determinar  $t_w$ :

- Localizar  $T_c$  en el eje de las X.
- Trazar una línea recta hasta interceptar la línea del vapor de agua, ver su representación gráfica.
- Luego trazar una línea horizontal sobre el eje Y.
- Leer la temperatura de pared ( $t_w$ ).

Ejemplo:

Se tiene un IDC con IPS de tubo exterior 2 y tubo exterior 1  $\frac{1}{4}$ , las temperaturas son para el aire 20°C ( $T_c$ ) con una velocidad de 2 m/s, para el vapor de agua 150°C ( $t_v$ ) con una velocidad de 2.5m/s, determine la temperatura de pared del tubo a esas condiciones.

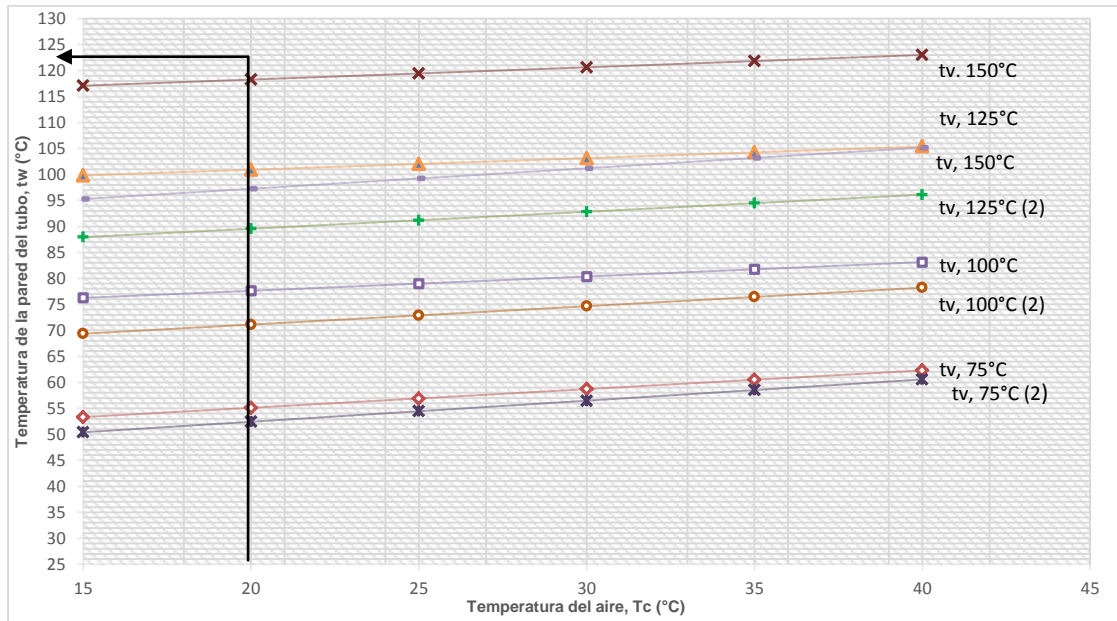
Solución

Pasos:

- Localizar  $T_c$  en el eje de las X (20 °C).
- Trazar una línea recta hasta interceptar la línea del vapor de agua (150 °C), ver su representación gráfica.
- Luego trazar una línea horizontal sobre el eje Y.
- Leer la temperatura de pared ( $t_w$ ).

(Ver figura 10)

Figura 10. Ejemplo del uso del nomograma



Fuente: elaboración propia.

Respuesta: la temperatura de pared es de  $119^\circ\text{C}$  las temperaturas son para el aire  $20^\circ\text{C}$  ( $T_c$ ) para el vapor de agua  $150^\circ\text{C}$  ( $t_v$ ).

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El nomograma elaborado es el denominado familia de ábacos, en la cual existe una ley matemática comprobable o empírica que lo describe. Los datos de las propiedades físicas tanto del aire como el vapor de agua son datos teóricos para que al hacer los cálculos, se tenga una mayor validez para que de como resultado un nomograma con mayor exactitud para su lectura.

Debido a que se obtuvo una serie de datos (números adimensionales) como variables de respuesta, se procedió a realizar la construcción de la familia de ábacos. Esta se realizó de la forma inversa a la habitual, en la que a partir de la serie de datos experimentales obtenidos de cada una de ecuaciones semiempíricas de la transferencia de calor, se genere una ecuación matemática empírica para cada temperatura de trabajo, para el aire que van desde los 15 hasta los 40 °C y utilizando distintas temperaturas de vapor de agua que van desde los 75 hasta los 150 °C. Que describiera el comportamiento físico del fenómeno de estudio, con lo que a partir de la ecuación obtenida se realiza la curva correspondiente para cada uno de los casos.

Estos datos se detallan en las tablas XV y XVI con sus respectivas condiciones de temperatura de trabajo, velocidad de cada fluido, IPS de cada intercambiador de calor y su correlación matemática para darle una mayor validez al ábaco generado. Cabe resaltar que los datos calculados fueron realizados para una suposición de un intercambiador de calor nuevo sin aislante.

Como la cantidad de variables y ecuaciones que se utilizaron para calcular la temperatura de pared del tubo interior fueron varias, se optó por realizar un nomograma de dos dimensiones, que sería la forma más sencilla de representación de una familia de ábacos para las cuales, al conocer una coordenada de temperatura con sus respectivas condiciones de trabajo, los fluidos puedan localizar en el nomograma un dato puntual de la temperatura de pared interior del tubo.

Con esto la finalidad del nomograma se cumple al utilizar una geometría analítica para este caso. Al realizar una recta a  $90^\circ$  se lee un valor en el eje de las ordenadas, obteniendo la lectura de la temperatura de la pared del tubo con gran facilidad y en el menor tiempo.

Finalmente se describe un instructivo sencillo del uso, manejo e interpretación del nomograma familia de ábacos, para determinar  $t_w$  en un IDC T-T con IPS de tubo exterior 2 y tubo interior  $1 \frac{1}{4}$  y con IPS de tubo exterior de 3 y tubo interior 2.



## CONCLUSIONES

1. La relación entre las variables implicadas son manipulables a diferentes condiciones como lo son el aire comparsa y el agua en régimen turbulento.
2. El tipo de nomograma que se adecúa a las condiciones de trabajo es el nomograma de familia de ábacos.
3. El funcionamiento del nomograma consiste básicamente en conocer las temperaturas del aire y del vapor de agua, así como el tipo de intercambiador de calor de tubos concéntricos a utilizar. Teniendo esta información se lee como un gráfico del tipo xy.



## RECOMENDACIONES

1. El nomograma construido, solamente es útil para los fluidos vapor de agua-aire y un intercambiador de calor nuevo (sin incrustaciones) sin aislante, estrictamente bajo las condiciones descritas. Si se desea conocer otra temperatura de pare a otras condiciones puede ser utilizado este, siempre y cuando la temperatura del aire esté en el rango de 15 a 40 °C y el vapor de agua en el rango de 75 a 150 °C, por medio de una interpolación lineal. Cabe resaltar que esta interpolación puede arrojar un porcentaje de error.
2. La utilidad del nomograma es netamente didáctico, especialmente realizado para el curso de Transferencia de Calor (IQ-3), con lo que la escala y el tipo de nomograma realizado pueden ser modificados según las necesidades del catedrático o estudiantes.
3. Se recomienda realizar otros nomogramas relacionados a la transferencia de calor para determinar la temperatura de pared del tubo interior, con otros sistemas que sean de uso cotidiano como los son el sistema agua-vapor de agua, agua-aire.



## BIBLIOGRAFÍA

1. BARO, Fernando. *Nociones de Nomografía*. [en línea] Madrid, España, Librería Internacional. 1917. <[http://books.google.com.gt/books?id=ZYsNAQAIAAJ&pg=PA117&lpg=PA117&dq=tipos+de+nomogramas&source=bl&ots=eU\\_iatukxo&sig=JVYhO\\_5uys\\_MPmPCpfuBp524io&hl=es-419&sa=X&ei=J6mDVLjsAvOCsQThy4HADQ&ved=0CGIQ6AEwDg#v=onepage&q=tipos%20de%20nomogramas&f=false](http://books.google.com.gt/books?id=ZYsNAQAIAAJ&pg=PA117&lpg=PA117&dq=tipos+de+nomogramas&source=bl&ots=eU_iatukxo&sig=JVYhO_5uys_MPmPCpfuBp524io&hl=es-419&sa=X&ei=J6mDVLjsAvOCsQThy4HADQ&ved=0CGIQ6AEwDg#v=onepage&q=tipos%20de%20nomogramas&f=false)>. [Consulta: 17 de noviembre de 2014].
2. BOHÓRQUEZ, Hernand. *Maquinaria y equipos de alimentos* [en línea] Universidad Nacional Abierta y a distancia, Escuela de ciencias básicas tecnología e ingeniería. <[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccion\\_43\\_intercambiadores\\_de\\_tubo\\_y\\_carcaza.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccion_43_intercambiadores_de_tubo_y_carcaza.html)>. [Consulta: 23 de octubre de 2013].
3. CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. José Hernán Pérez (trad). 2da ed. México. McGraw-Hill Interamericana. 2004. 900p. ISBN 970-10-4484-3.
4. ESCRIBANO, José. *La nomografía: una ciencia olvidada*. [en línea] <<http://www.sinewton.org/numeros/numeros/54/Articulo04.pdf>>. [Consulta: 11 de octubre de 2013].

5. GEANKOPLIS, Cristian. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 2da ed. México. Editorial Continental. 1998, 1007p.
6. GONZALES, Rosinda. *Guía Intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones*. [en línea] Universidad Simón Bolívar. Sarteneja, 2002. <http://www.slideshare.net/yumardiaz/intercambiadores-decalortiposgeneralesyaplicaciones>. [Consulta 1 de octubre de 20113].
7. KERN, Donald, *Procesos de transferencia de calor*. 31a. reimpresión, México: Continental, 1999. 978p ISBN 968-26- 1040-0.
8. MCCABE, Warren. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*, 4a. ed. McGraw Hill, 1992. 1168p. ISBN 9701061748, 9789701061749
9. MICRO GESTIÓN, *Nomogramas* [en línea]. <http://www.microgestion.com/index.php/mg-developers/item,/5-nomograma?p=213>. [Consulta 11 de octubre 2013].
10. MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. Pablo Guerrero (edit.). 6a. ed. México: Pearson Educación, 2006. 875p. ISBN 970-26-0805-8.
11. WARPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a. ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1999. 992p. ISBN 970-17-0264-6.

12. ZARATE, Fabrisio, *Ábacos o nomogramas*. [en línea] [http://matematicas.uis.edu.co/~integracion/rint-html/volumen/vol2\(1\)1983/vol2i83-artFZ.pdf](http://matematicas.uis.edu.co/~integracion/rint-html/volumen/vol2(1)1983/vol2i83-artFZ.pdf). [Consulta: 10 de octubre de 2013].





## APÉNDICES

Apéndice 1. Tabulación de los datos calculados para los diversos números adimensionales para el vapor de agua

VAPOR DE AGUA			
Velocidad fluido 2,5 m/s, IPS diámetro tubo interior 1 ¼			
Temperatura (°C)	Número de Reynolds (Adimensional)	Factor de fricción (Adimensional)	Nusselt (adimensional)
50	5 002,539425	0,038613385	19,2743123
75	4 294,990397	0,040508613	16,6091918
100	3 692,035573	0,042529897	14,2178397
125	3 219,48489	0,0444933	12,2389986
Velocidad fluido 3,5 m/s, IPS diámetro tubo interior 2			
Temperatura (°C)	Número de Reynolds (Adimensional)	Factor de fricción (Adimensional)	Nusselt (adimensional)
150	2 811,446246	0,046573085	10,4369907
50	11 205,68831	0,030498761	38,8034263
75	9 620,778489	0,031823762	34,111916
100	8 270,159684	0,033225298	29,9595443
125	7 211,646154	0,034575631	26,571664
150	6 297,63959	0,035994508	23,5361011

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Tabulación de los datos calculados para los diversos números adimensionales para el aire con IPS diámetro tubo exterior 2.

AIRE		
Velocidad fluido 2 m/s, IPS diámetro tubo exterior 2		
Temperatura (°C)	Número de Reynolds (Adimensional)	Nusselt (adimensional)
15	6 906,770255	44,33818723
20	6 702,816438	43,59153193
25	6 505,916712	42,86442579
30	6 317,435897	42,1575623
35	6 138,891821	41,47951726
40	5 969,927007	40,83209578
Velocidad fluido 3,5m/s, IPS diámetro tubo exterior 2		
Temperatura (°C)	Número de Reynolds (Adimensional)	Nusselt (adimensional)
15	12 086,84795	60,31347264
20	11 729,92877	59,26730026
25	11 385,35425	58,24931018
30	11 055,51282	57,26060038
35	10 743,06069	56,3130039
40	10 447,37226	55,40886363

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Tabulación de los datos calculados para los diversos números adimensionales para el aire IPS diámetro de tubo exterior 2

Velocidad fluido 5 m/s, IPS diámetro tubo exterior 2		
Temperatura (°C)	Número de Reynolds (Adimensional)	Nusselt (adimensional)
15	17 266,9256	73,78918638
20	16 757,0411	72,48025346
25	16 264,7917	71,20732092
30	15 793,5897	69,97188159
35	15 347,2295	68,78856941
40	14 924,8175	67,66014118
Velocidad fluido 3,75 m/s, IPS diámetro tubo exterior 2		
Temperatura (°C)	Número de Reynolds (Adimensional)	Nusselt (adimensional)
15	12 950,19423	62,68957132
20	12 567,78082	61,59770503
25	12 198,59383	60,53536587
30	11 845,19231	59,50371806
35	11 510,42216	58,51508513
40	11 193,61314	57,57188543

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Tabulación de los datos calculados para los diversos números adimensionales para el aire IPS diámetro de tubo exterior 3

Velocidad fluido 3 m/s, IPS diámetro tubo exterior 3		
Temperatura (°C)	Número de Reynolds (Adimensional)	Nusselt (adimensional)
15	15 540,23307	69,48704032
20	15 081,33699	68,26292938
25	14 638,3126	67,07227349
30	14 214,23077	65,91643444
35	13 812,5066	64,80914702
40	13 432,33577	63,75303954
Velocidad fluido 4 m/s, IPS diámetro tubo exterior 3		
Temperatura (°C)	Número de Reynolds (Adimensional)	Nusselt (adimensional)
15	20 720,31077	81,96061801
20	20,108,44932	80,48830512
25	19 517,75014	79,05694671
30	18 952,30769	77,66829671
35	18 416,67546	76,33870891
40	17 909,78102	75,07117542

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Tabulación de los datos calculados para los diversos números adimensionales para el aire IPS diámetro de tubo exterior 3

Velocidad fluido 4,5 m/s, IPS diámetro tubo exterior 3		
Temperatura (°C)	Número de Reynolds (Adimensional)	Nusselt (adimensional)
15	23 310,34961	87,78174176
20	22 622,00548	86,19131868
25	21 957,4689	84,64546978
30	21 321,34615	83,14614416
35	20 718,75989	81,71093006
40	20 148,50365	80,34298051
Velocidad fluido 2,5 m/s, IPS diámetro tubo exterior 3		
Temperatura (°C)	Número de Reynolds (Adimensional)	Nusselt (adimensional)
15	12 950,19423	62,68957132
20	12 567,78082	61,59770503
25	12 198,59383	60,53536587
30	11 845,19231	59,50371806
35	11 510,42216	58,51508513
40	11 193,61314	57,57188543

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Temperatura de pared a diversas condiciones de trabajo y su coeficiente de película interno y externo

Condición de velocidad patrón 2,5 m/s, velocidad comparsa 2 m/s , IPS tubo exterior 2 y tubo interior 1 ¼				
Temperatura del vapor de agua (°C)	hcov interior ((W/m <sup>2</sup> K)	Temperatura del aire (°C)	hcov exterior ((W/m <sup>2</sup> K)	tw (°C)
75	11,66828421	15	20,63296744	53,3260085
	11,66828421	20	20,60300555	55,1137284
	11,66828421	25	20,57998711	56,9086671
	11,66828421	30	20,54766225	58,7014632
	11,66828421	35	20,52746189	60,5033219
	11,66828421	40	20,50446385	62,3063393

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Temperatura de pared a diversas condiciones de trabajo y su coeficiente de película interno y externo

Condición de velocidad patrón 2,5 m/s, velocidad comparsa 3,5 m/s , IPS tubo exterior 2 y tubo interior 1 1/4				
Temperatura del vapor de agua (°C)	hcov interior (W/m <sup>2</sup> K)	Temperatura del aire (°C)	hcov exterior (W/m <sup>2</sup> K)	tw (°C)
100	10,87720716	15	28,06713569	76,2593861
	10,87720716	20	28,01196613	77,6241946
	10,87720716	25	27,96654873	78,9981551
	10,87720716	30	27,9089068	80,369147
	10,87720716	35	27,86828579	81,7522398
	10,87720716	40	27,82441164	83,1368183

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Temperatura de pared a diversas condiciones de trabajo y su coeficiente de película interno y externo

Condición de velocidad patrón 2,5 m/s, velocidad comparsa 5 m/s , IPS tubo exterior 2 y tubo interior 1 ¼				
Temperatura del vapor de agua (°C)	hcov interior ((W/m <sup>2</sup> K)	Temperatura del aire (°C)	hcov exterior ((W/m <sup>2</sup> K)	tw (°C)
125	10,19595313	15	34,33811744	99,8158021
	10,19595313	20	34,2569072	100,916621
	10,19595313	25	34,18792435	102,0278
	10,19595313	30	34,10440528	103,135266
	10,19595313	35	34,04221722	104,256923
	10,19595313	40	33,97657877	105,380205

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Temperatura de pared a diversas condiciones de trabajo y su coeficiente de película interno y externo

Condición de velocidad patrón 2,5 m/s, velocidad comparsa 3,75 m/s , IPS tubo exterior 2 y tubo interior 1 ¼				
Temperatura del vapor de agua (°C)	hcov interior ((W/m <sup>2</sup> K)	Temperatura del aire (°C)	hcov exterior ((W/m <sup>2</sup> K)	tw (°C)
150	9,404797003	15	29,1728635	117,088528
	9,404797003	20	29,1134035	118,258548
	9,404797003	25	29,06412547	119,440277
	9,404797003	30	29,00220589	120,615368
	9,404797003	35	28,95805591	121,807319
	9,404797003	40	28,91060624	122,999692

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. Temperatura de pared a diversas condiciones de trabajo y su coeficiente de película interno y externo

Condición de velocidad patrón 3,5 m/s, velocidad comparsa 3 m/s , IPS tubo exterior 3 y tubo interior 2				
Temperatura del vapor de agua (°C)	hcov interior ((W/m <sup>2</sup> K)	Temperatura del aire (°C)	hcov exterior ((W/m <sup>2</sup> K)	tw (°C)
75	14,9776828	15	21,55739676	50,4027915
	14,9776828	20	21,50909363	52,4227094
	14,9776828	25	21,4684088	54,4522785
	14,9776828	30	21,41851597	56,4817
	14,9776828	35	21,38191543	58,5227191
	14,9776828	40	21,34304513	60,5669496

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Temperatura de pared a diversas condiciones de trabajo y su coeficiente de película interno y externo

Condición de velocidad patrón 3.5m/s, velocidad comparsa 4m/s , IPS tubo exterior 3 y tubo interior 2				
Temperatura del vapor de agua (°C)	hcov interior ((W/m <sup>2</sup> K)	Temperatura del aire (°C)	hcov exterior ((W/m <sup>2</sup> K)	tw (°C)
100	14,3251443	15	25,42715236	69,3693857
	14,3251443	20	25,36121005	71,123285
	14,3251443	25	25,3044479	72,8893041
	14,3251443	30	25,23710008	74,6536094
	14,3251443	35	25,18576302	76,4334853
	14,3251443	40	25,1320956	78,216706

Fuente: elaboración propia.



Apéndice 12. Temperatura de pared a diversas condiciones de trabajo y su coeficiente de película interno y externo

Condición de velocidad patrón 3,5 m/s, velocidad comparsa 4,5 m/s , IPS tubo exterior 3 y tubo interior 2				
Temperatura del vapor de agua (°C)	hcov interior ((W/m <sup>2</sup> K)	Temperatura del aire (°C)	hcov exterior ((W/m <sup>2</sup> K)	tw (°C)
125	13,8350494	15	27,23307579	87,943148
	13,8350494	20	27,15818322	89,5629267
	13,8350494	25	27,09321533	91,1968336
	13,8350494	30	27,01704107	92,8271129
	13,8350494	35	26,95817299	94,4764381
	13,8350494	40	26,89697418	96,1288785

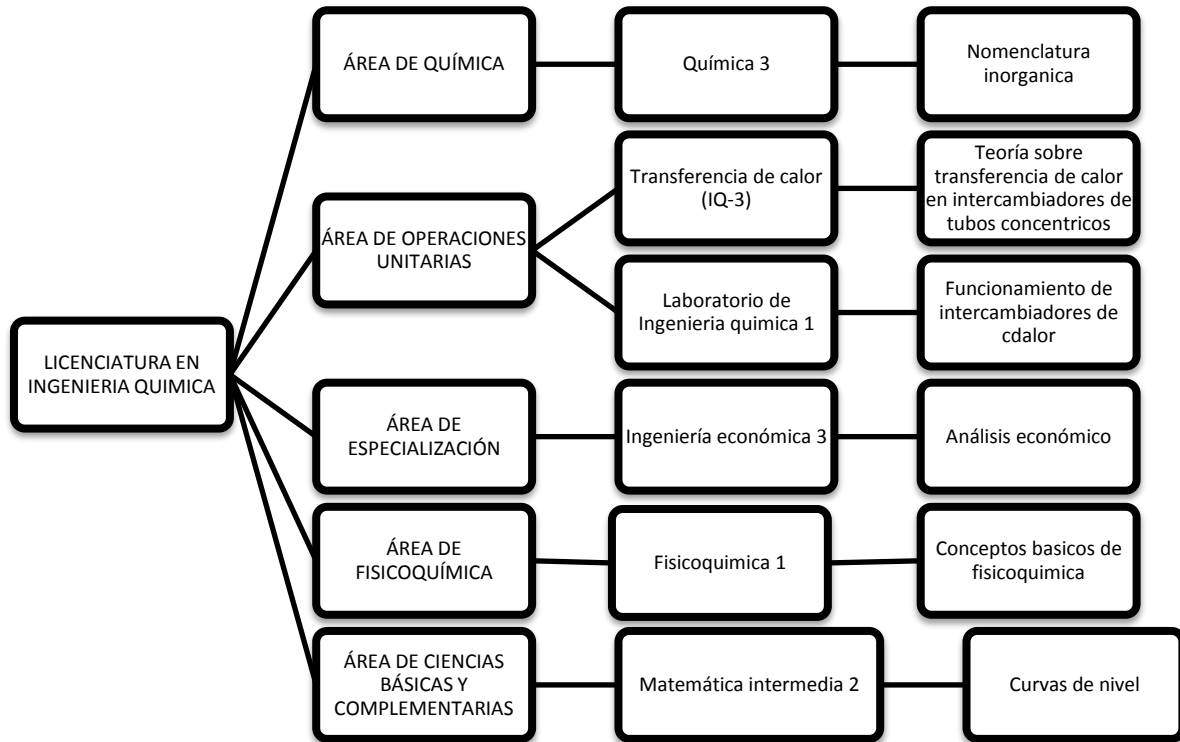
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. Temperatura de pared a diversas condiciones de trabajo y su coeficiente de película interno y externo

Condición de velocidad patrón 3,5 m/s, velocidad comparsa 2,5 m/s , IPS tubo exterior 3 y tubo interior 2				
Temperatura del vapor de agua (°C)	hcov interior ((W/m <sup>2</sup> K)	Temperatura del aire (°C)	hcov exterior ((W/m <sup>2</sup> K)	tw (°C)
150	13,2552727	15	19,44857567	95,2828366
	13,2552727	20	19,40893567	97,245455
	13,2552727	25	19,37608364	99,2234074
	13,2552727	30	19,33480393	101,192728
	13,2552727	35	19,3053706	103,184083
	13,2552727	40	19,2737375	105,176011

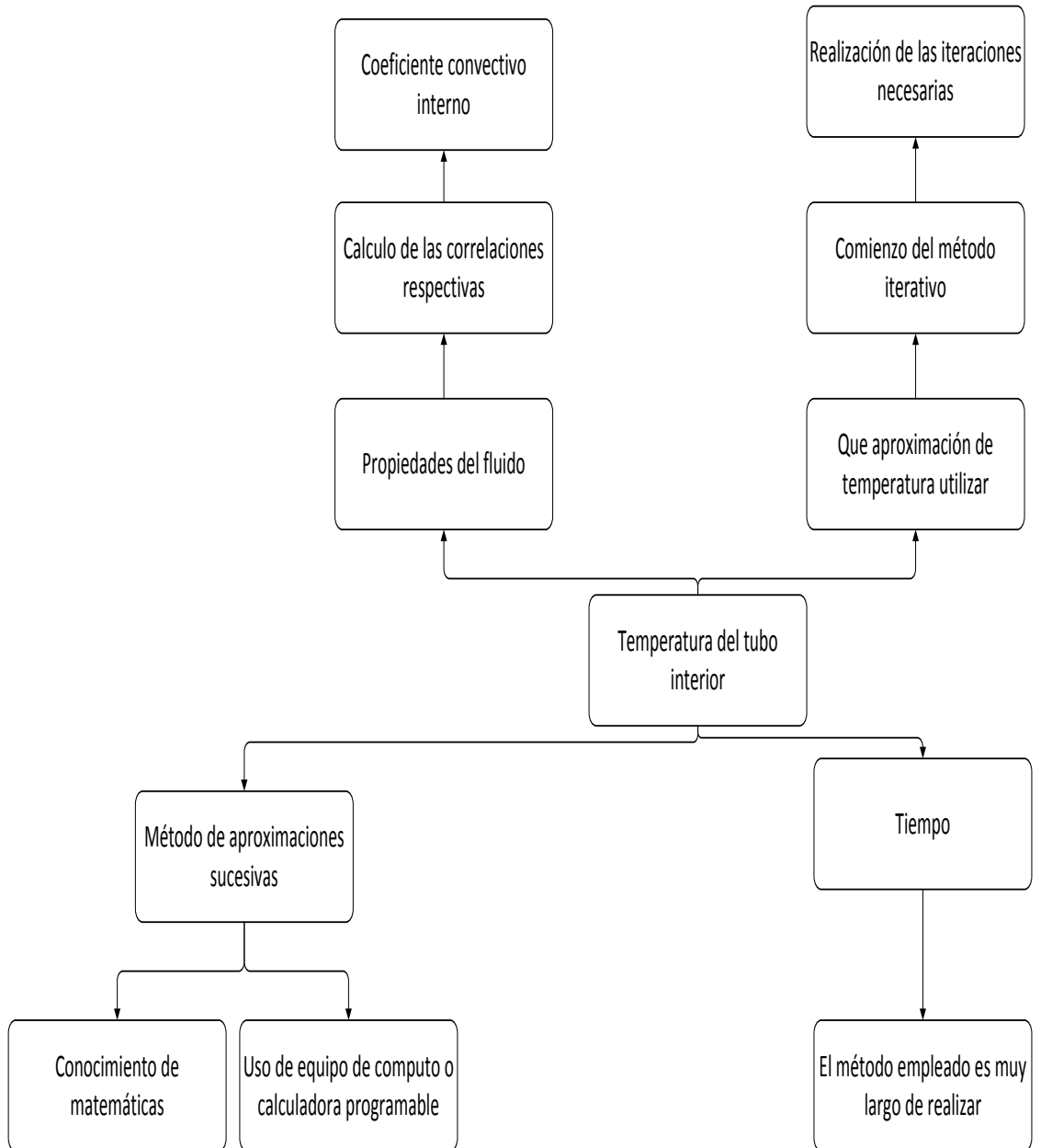
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

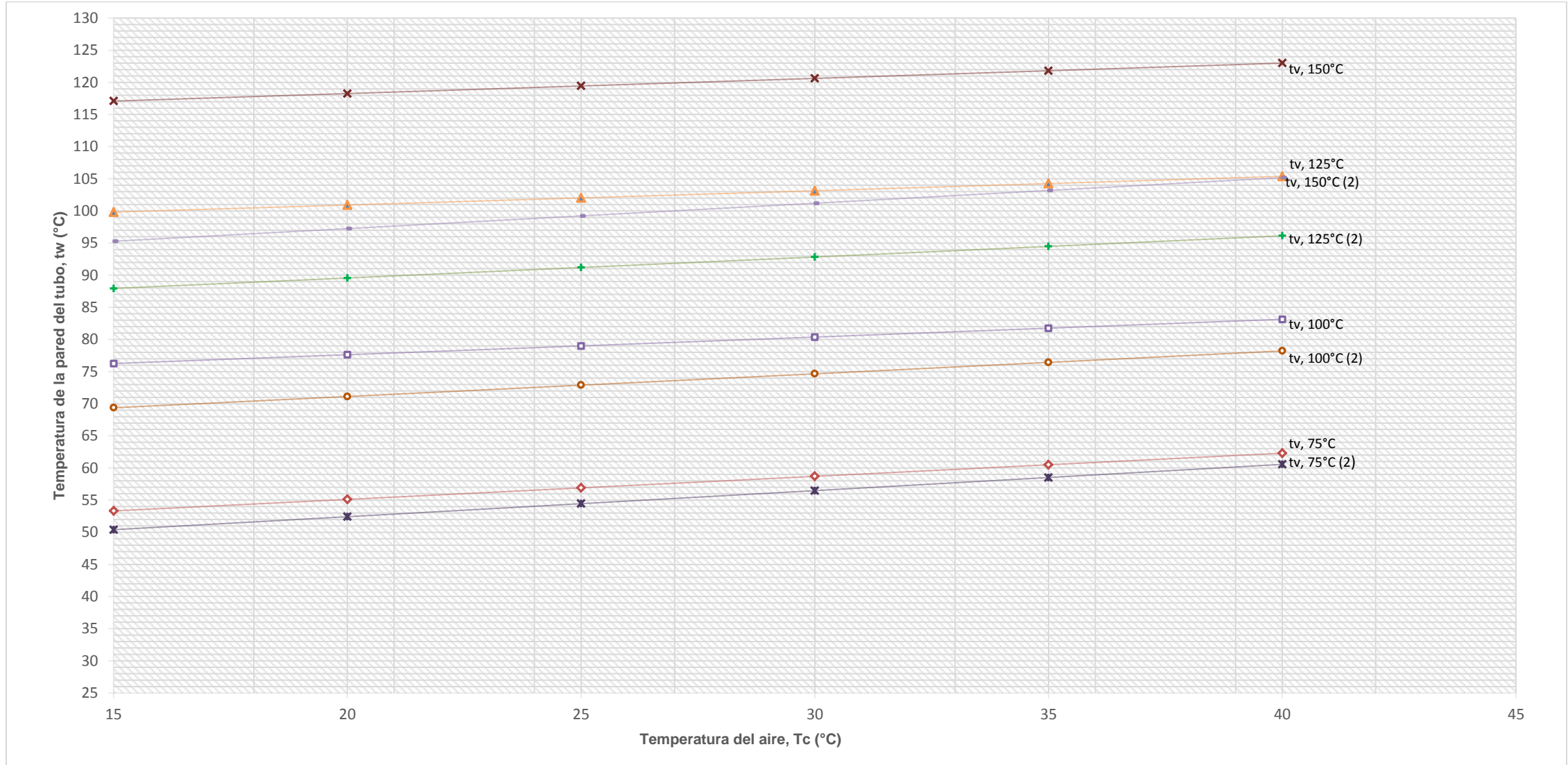
Apéndice 15. Diagrama árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.



**Nomograma familia de ábacos para determinar  $t_w$  en un IDC T-T con IPS de tubo exterior 2 y tubo interior 1 ¼ y con IPS de tubo exterior de 3 y tubo interior 2**



Clave  
 $T_c$ = Temperatura del aire (°C)  
 $t_v$ = Temperatura del vapor (°C)  
 $t_w$ = Temperatura del tubo interior (°C)  
 \*La notación (2) para  $t_v$  indica que es un IDC T-T, tubo exterior 3 y tubo interior 2  
 \*\*Sin notación para  $t_v$  indica que es un IDC T-T, tubo exterior 2 y tubo interior 1 ¼