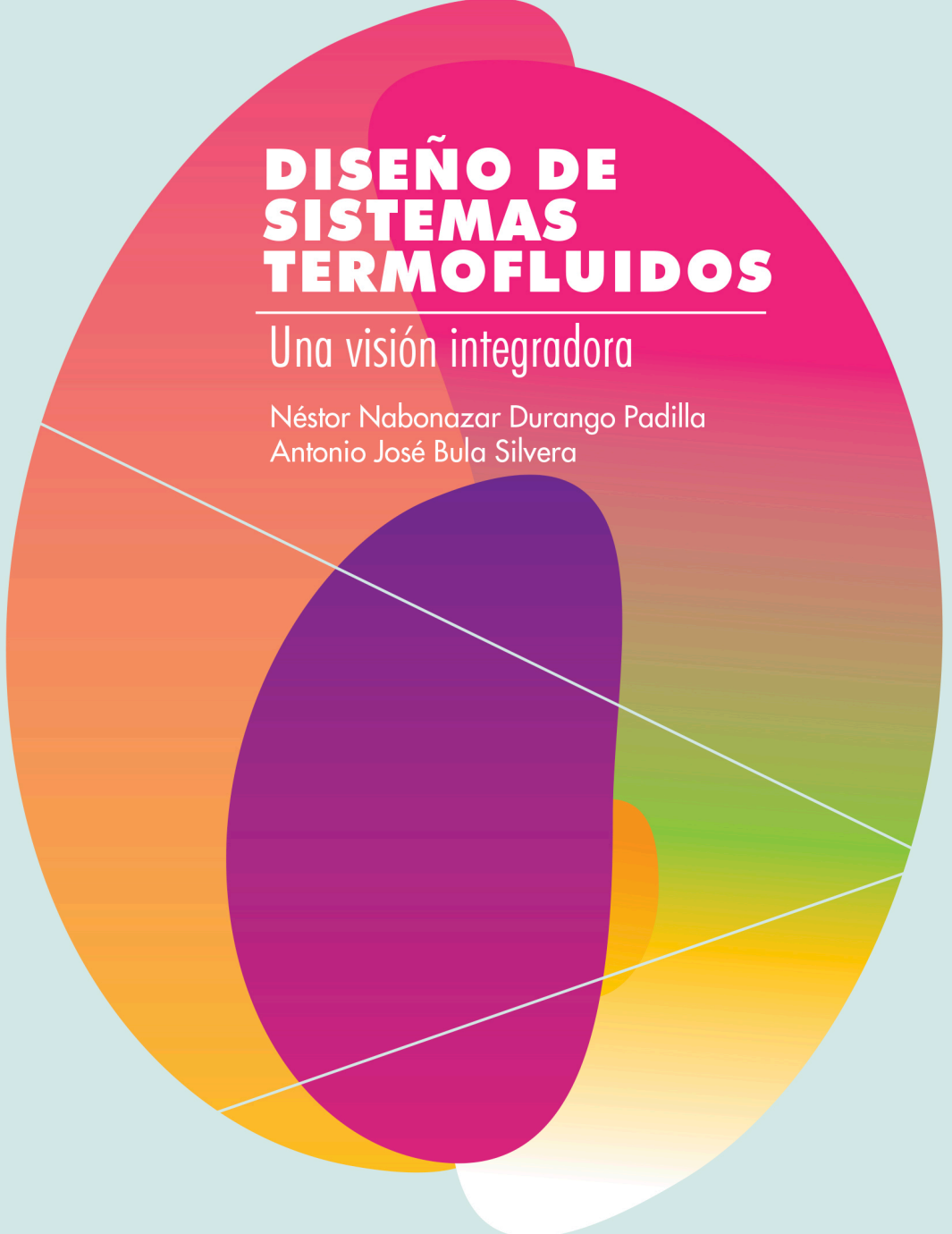




DISEÑO DE SISTEMAS TERMOFLUIDOS

Una visión integradora

Néstor Nabonazar Durango Padilla
Antonio José Bula Silvera

DISEÑO DE SISTEMAS TERMOFLUIDOS

Una visión integradora

DISEÑO DE SISTEMAS TERMOFLUIDOS

Una visión integradora

Néstor Nabonazar Durango Padilla
Antonio José Bula Silvera

Área metropolitana
de Barranquilla (COLOMBIA), 2016

 **UNIVERSIDAD
DEL NORTE**
Editorial

de la
ediciones 

Durango Padilla, Néstor Nabonazar.

Diseño de sistemas termofluidos : una visión integradora / Néstor Nabonazar Durango Padilla, Antonio José Bula Silvera. — Barranquilla, Col. : Editorial Universidad del Norte, 2016.

88 p. : il. ; 24 cm.

Incluye referencias bibliográficas en cada capítulo.

ISBN 978-958-741-742-5 (impreso)

ISBN 978-958-741-743-2 (PDF)

1. Termodinámica—Problemas, ejercicios, etc. I. Bula Silvera, Antonio José. II. Tit.

(621.4021076 D949 23 ed.) (CO-BrUNB)



Vigilada Mineducación

www.uninorte.edu.co

Km 5, vía a Puerto Colombia, A.A. 1569

Área metropolitana de Barranquilla (Colombia)



www.edicionesdelau.com

Carrera 27 n° 27-43, Barrio Teusaquillo
Bogotá (Colombia)

© Universidad del Norte, 2016

Néstor Nabonazar Durango Padilla y Antonio José Bula Silvera

Coordinación editorial

Zoila Sotomayor O.

Diseño y diagramación

Álvaro Carrillo Barraza

Diseño de portada

Jorge Arenas

Corrección de textos

Henry Stein

Impreso y hecho en Colombia

Xpress Estudio Gráfico y Digital (Bogotá)

Printed and made in Colombia

© Reservados todos los derechos. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio reprográfico, fónico o informático, así como su transmisión por cualquier medio mecánico o electrónico, fotocopias, microfilm, *offset*, mimeográfico u otros, sin autorización previa y escrita de los titulares del copyright. La violación de dichos derechos constituye un delito contra la propiedad intelectual.

LOS AUTORES

NÉSTOR NABONAZAR DURANGO PADILLA

Ingeniero mecánico, Universidad Industrial de Santander (Colombia). Magíster en Sistemas de generación de energía eléctrica, Universidad del Valle (Colombia). Se ha desempeñado en el área de mecánica de fluidos, máquinas hidráulicas, máquinas térmicas y sistemas de secado. Es profesor asociado de la División de Ingenierías de la Universidad del Norte (Colombia) y hasta el año 2010 fue coordinador del programa de Ingeniería Mecánica en la misma universidad.

ANTONIO JOSÉ BULA SILVERA

Ingeniero mecánico, Universidad del Norte (Colombia). Doctor y magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad del Sur de la Florida (USA). Se ha desempeñado en el área de refrigeración y aire acondicionado, combustión, eficiencia energética y uso de energías renovables. Es profesor titular del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte. Además, es investigador Senior de Colciencias y autor de más de 80 artículos en revistas y conferencias. A nivel industrial, es titular de cinco patentes y se ha desempeñado como director en más de 15 proyectos.

Contenido

Prefacio	xi
--------------------	----

Capítulo 1

INTERCAMBIADORES DE CALOR, IC.	1
1. Tipos de intercambiadores de calor.	1
2. Clasificaciones de los intercambiadores de calor	3
2.1. Según el contacto que haya entre los fluidos que se transfieren calor	4
2.2. Según la densidad del área de transferencia de calor: $\beta \text{ m}^2/\text{m}^3$	4
2.3. Según la forma constructiva	5
2.4. Clasificación según el arreglo de los flujos.	5
3. Consideraciones para el diseño	6
3.1. Fases del diseño de los sistemas termofluidos.	6
3.2. Metodología del diseño de los intercambiadores de calor.	8
3.3. Fases del diseño o selección de los intercambiadores de calor, IC	8
3.4. Consideraciones para el Diseño Térmico e Hidráulico	9
3.5. Efectos de la Velocidad Media	9
3.6. Efectos del Área de Transferencia de Calor	9
3.7. Efectos de la turbulencia	10
4. Diseño básico de recuperadores	11
4.1. Analogía del flujo de calor con los sistemas eléctricos.	11
4.2. Coeficiente global de transferencia de calor U	11
4.3. Relaciones básicas entre parámetros y variables del IC.	13
4.4. Diferencia media de temperatura logarítmica ΔT_{ml}	16

5. Cálculo de un IC	26
5.1. Método de la diferencia media de temperatura logarítmica	27
5.2. Método ϵ - NTU	28
5.3. Método P- NTU	29
6. Caída de presión en intercambiadores de calor	33
6.1. Importancia de la caída de presión	33
6.2. Caída de presión en IC de placas aleteadas	35
6.3. Caída de presión en IC de tubos aleteados	35
6.4. Caída de presión en IC tubulares.	35
6.5. Caída de presión en IC de placas.	36
7. Consideraciones para la selección de IC	37
8. Preguntas y ejercicios propuestos	38
Referencias	

Capítulo 2

SISTEMAS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS: TUBERÍAS.	43
1. Depósitos	44
2. Tuberías y accesorios	46
2.1. Especificaciones de los tubos	46
2.2. Diámetro económico	47
2.3. Ecuación de la energía.	48
2.4. Pérdidas de energía en la tubería	48
2.5. Pérdidas en accesorios.	49
2.6. Tuberías no circulares	49
2.7. Flujo compresible	50
3. Curva característica de un sistema de tuberías	59
3.1. Curva característica de una tubería simple	61
3.2. Curva característica de tuberías en serie	64
3.3. Curva característica de tuberías en paralelo	66
3.4. Tuberías ramificadas	69
4. Ejercicios propuestos	73
Referencias	

Capítulo 3

MÁQUINAS DE FLUJO	78
1. Clasificaciones de las máquinas de flujo	78
1.1. Según la dirección del flujo de potencia	78
1.2. Según el principio de funcionamiento	79
1.3. Según la variación de la densidad del fluido en la máquina	80
2. Parámetros constructivos y de operación	81
3. Máquinas de flujo de desplazamiento positivo	81
3.1. Bombas de pistón	81
3.2. Bombas de diafragma	86
3.3. Bombas de engranajes	88
3.4. Bombas de rotor lobular Boerger lobe pumps	90
3.5. Bombas de paletas vane pumps	90
3.6. Bombas de tornillos	92
3.7. Bombas peristálticas	93
3.8. Características de funcionamiento de las bombas de desplazamiento positivo	93
4. Máquinas de flujo rotodinámicas (turbomáquinas)	94
4.1. Bombas radiales o centrífugas	95
4.3. Parámetros constructivos y de operación	97
4.4. Capacidad de aspiración. NPSH requerido	104
4.5. Bombas axiales	107
4.6. Semejanza de las máquinas de flujo rotodinámicas	113
5. Compresores	117
5.1. Definición de compresor	117
5.2. Clasificación. Tipos de compresores	117
5.3. Principio de funcionamiento	118
5.4. Curva característica	119
5.5. Retroceso o Bombeo (<i>Surge</i>)	119
5.6. Aumento de la presión y de la temperatura en el compresor	120
5.7. Estados termodinámicos asociados a la compresión	120
5.8. Ecuaciones para el cálculo termodinámico de una etapa de un compresor	121
5.9. Presiones intermedias en múltiples etapas	123
6. Ejercicios propuestos	125
Referencias	

Capítulo 4

VÁLVULAS DE CONTROL	131
1. Capacidad de la válvula	131
2. Curva de caudal inherente	133
2.1. Válvula lineal	134
2.2. Válvula isoporcentual	134
3. Curva de caudal efectiva	136
3.1. Procedimiento para el trazado de la curva efectiva de una válvula instalada	137
3.2. Procedimiento para el trazado de la curva H-Q de una tubería provista de una válvula de control lineal o isoporcentual	139
4. Selección del tamaño de la válvula	139
4.1. Procedimiento para seleccionar una válvula para líquidos	140
4.2. Procedimiento para seleccionar una válvula para vapores y gases	145
5. Ejercicios resueltos	149
6. Ejercicios propuestos	152
Referencias	

Capítulo 5

DISEÑO BÁSICO DE UN SISTEMA DE TERMOFLUIDOS	155
1. Determinación de los valores de las variables	156
1.1. Requerimientos generales de diseño	156
1.2. Propiedades de la carne para refrigeración	156
1.3. Calor a retirar de la carne	156
1.4. Esquema termodinámico	157
1.5. Refrigerante	159
2. Especificaciones de los intercambiadores de calor	160
2.1. Cuarto de refrigeración	160
2.2. Ciclo del refrigerante	161
2.3. Ciclo del agua de enfriamiento	164
2.4. Estimación de la Torre de enfriamiento	171

3. Especificaciones de las máquinas de flujo	172
3.1. Ventilador para aire de refrigeración	172
3.2. Bomba para el agua de enfriamiento.	175
4. Problemas propuestos	181
Apéndice	
Tabla A1. Constantes de las ecuaciones	187
Tabla A2. Coeficientes indicadores del tamaño de Reguladores tipo 1098-EGR	188
Tabla A3. Coeficientes indicadores del tamaño de válvulas de eje rotativo	189
Tabla A4. Coeficientes indicadores del tamaño de válvulas de globo, Diseño ED simple.	190

Prefacio

Este libro se comenzó a escribir a finales de 2013 para que sirviera a los Estudiantes de pregrado del programa de Ingeniería Mecánica como guía de estudio en el curso Diseño de Sistemas Termofluidos, de manera que facilite la comprensión de los conceptos, el entendimiento de las características principales de los procesos termofluidos y los ayude a calcular, dimensionar y seleccionar intercambiadores de calor, sistemas de transporte de fluidos y máquinas de flujo, consideradas por los autores como sistemas transversales en los procesos termofluidos.

Termofluidos es una de las dos áreas de formación de Ingeniería Mecánica. La otra área es Máquinas, la cual incluye materiales de ingeniería y procesos de manufactura. Las dos áreas se nutren de la formación básica en matemáticas y ciencias naturales, y a pesar de tener elementos comunes, por lo general se imparten en forma paralela a lo largo del plan de estudio en las escuelas de ingeniería. Al final de la carrera el estudiante tiene la oportunidad de realizar un trabajo de diseño con alcances y restricciones, tal como ocurre en el ejercicio profesional, en el cual debe integrar los conocimientos y habilidades adquiridos en las dos áreas de formación.

El curso Diseño de Sistemas Termofluidos y su análogo de la otra área, Diseño de Sistemas Mecánicos, inician en el estudiante la formación de

las competencias para realizar diseños en ingeniería mecánica a partir de los temas de cada área.

Sin perder de vista que solo se trata de un ingeniero en formación, en el curso se le exige al estudiante la capacidad para analizar y sintetizar el enunciado de un problema, buscar información pertinente, tener dominio de los criterios fundamentales para tomar decisiones acertadas, formular y evaluar alternativas, y desarrollar y defender un diseño como solución a un problema real bajo restricciones reales dadas.

Para ayudar al estudiante a dar cumplimiento a este cometido, el libro sigue la secuencia temática del curso: Intercambiadores de calor, Transporte de fluidos, Máquinas de Flujo, y termina con un capítulo dedicado a las válvulas de control. En cada unidad temática se estudian las características, las clasificaciones y los criterios de selección de los dispositivos involucrados.

En paralelo con el desarrollo de los temas, los estudiantes realizan un trabajo en grupo relacionado con un problema real, presentan un informe de avance y el informe final, de los cuales reciben realimentación; después de entregar los informes se les pide que hagan una presentación oral de la solución encontrada al problema.

Este libro se constituye en una guía tanto para impartir las clases como para la realización del trabajo. Con este propósito, los ejercicios resueltos tienen relación con el entorno y con las restricciones que normalmente se encuentran en una situación real. Los ejercicios propuestos pueden ser reemplazados o complementados con otros que sean más adecuados al enunciado del trabajo que se proponga en un semestre académico. Se recomienda al profesor dejar problemas de solución abierta, similares a los resueltos, como ejercicio a los estudiantes.

CAPÍTULO 1

Intercambiadores de calor, IC

Este capítulo permite evaluar el desempeño de los intercambiadores de calor, de manera que se comprenda el proceso de diseño y se pueda seleccionar el IC más apropiado para que funcione en un sistema termofluido especificado, cumpliendo restricciones dadas.

Los temas que se tratarán son: Tipos de IC, Clasificaciones de los IC, Consideraciones para el diseño, Diseño básico de recuperadores, Cálculo de IC, Consideraciones para la selección.

1. TIPOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

DEFINICIÓN

Un *intercambiador de calor (IC)* es un dispositivo usado para transferir energía térmica entre dos o más fluidos, entre una superficie sólida y un fluido o entre partículas sólidas y un fluido que están en contacto térmico y a diferentes temperaturas. Los flujos cambian su energía térmica, variando su calor sensible o su calor latente, o ambos.

Por lo general no hay trabajo realizado y se desprecia el intercambio de calor con el exterior. Algunos tienen generación de calor, por ejemplo, mediante fuente eléctrica o combustión.

APLICACIONES TÍPICAS

Los intercambiadores de calor son de uso común en los procesos de producción y están relacionados con las operaciones unitarias (básicas), como esterilización, pasteurización, fraccionamiento, secado, destilación, concentración, cristalización, almacenamiento, transporte o control de un fluido en un proceso. Se usan para suplir las necesidades de:

- Calentar o enfriar un flujo.
- Evaporar o condensar un flujo simple o de múltiples componentes.
- Recuperar o rechazar calor de un proceso.

DENOMINACIONES ESPECIALES

Recuperadores o IC Directos:

- Son intercambiadores de calor en los cuales la energía térmica se transfiere por conducción de un fluido caliente a uno frío, a través de una pared que los separa.
- Los flujos no se mezclan ni se presentan fugas de los fluidos al exterior.

IC Indirectos de flujo periódico o regeneradores:

- Son IC en los cuales el intercambio de calor es intermitente.
- El elemento principal es una matriz móvil sinfín que es atravesada por el fluido caliente el cual cede calor a la matriz, y por el fluido frío, el cual se calienta a su paso por la matriz. O es una matriz estacionaria atravesada alternativamente por los fluidos caliente y frío.
- Se producen fugas debido a la diferencia de presión y a que existe movimiento relativo entre la matriz y los conductos que transportan los flujos caliente y frío.
- Ejemplo, el precalentador de aire Ljungstrom.

IC Indirectos de acople líquido:

- Son los IC en los cuales un líquido auxiliar permite el intercambio de calor entre los fluidos caliente y frío.
- Son dos intercambiadores directos conectados térmicamente mediante un líquido bombeado, el cual circula por el intercambiador caliente, donde toma calor, y por el intercambiador frío, donde entrega calor.
- Ejemplo, el sistema de refrigeración del automóvil convencional.

EJEMPLOS DE IC

Algunos intercambiadores de calor son muy comunes y se construyen en forma masiva de manera que adoptan nombres especiales:

- Intercambiadores de tubo y coraza.
- Radiadores de automóviles.
- Evaporadores.
- Condensadores.
- Precalentadores de aire (economizadores).
- Torres de enfriamiento.
- Intercambiadores con generación interna de calor mediante resistencia eléctrica o combustible nuclear.
- Intercambiadores de calor con combustión, como las calderas y los tubos radiantes.
- Intercambiadores con dispositivos mecánicos, como raspadores y agitadores en vasijas y reactores.

2. CLASIFICACIONES DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

Los intercambiadores de calor son muy diversos, por lo que se clasifican atendiendo diferentes criterios:

- Según la forma en que entren en contacto los fluidos que se transfieren calor.

- Según la densidad del área de transferencia de calor, β [m^2/m^3].
- Según la forma constructiva.
- Según el arreglo de los flujos.

2.1 SEGÚN EL CONTACTO QUE HAYA ENTRE LOS FLUIDOS QUE SE TRANSFIEREN CALOR

IC en los cuales el fluido caliente y el fluido frío entran en contacto:

- Fluidos inmiscibles: condensación de aceite con agua o con aire.
- Gas-líquido: torre de enfriamiento de agua, atomizadores.
- Líquido-vapor: desrecalentadores, desaireadores en plantas de vapor. Inyectores.

IC en los cuales los fluidos caliente y frío NO entran en contacto:

- Directos o recuperadores.
- Indirectos de acople líquido.
- Indirectos de flujo periódico, de matriz fija o giratoria.
- De lecho fluidificado.

2.2 SEGÚN LA DENSIDAD DEL ÁREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR: β m^2/m^3

IC Compactos

La *compacidad* es la relación entre la superficie de transferencia de calor y el volumen del intercambiador: $\beta \frac{m^2}{m^3} = \frac{A}{V}$. Los intercambiadores de calor deben ser compactos cuando el coeficiente de transferencia de calor es bajo. Los IC compactos requieren que los fluidos sean limpios y que la presión y la temperatura de trabajo sean bajas; en ellos la caída de presión es alta. Los intercambiadores de calor se consideran compactos cuando:

- $\beta > 700 \text{ } m^2/m^3$, si al menos uno de los fluidos es gas.
- $\beta > 400 \text{ } m^2/m^3$, si ambos fluidos son líquidos.

La compacidad aumenta disponiendo aletas en la superficie de transferencia de calor o disminuyendo el diámetro hidráulico del flujo. Los intercambiadores de calor no compactos tienen efectividad menor que 60 %; son largos en la dirección del flujo.

2.3 SEGÚN LA FORMA CONSTRUCTIVA

Tubulares

- Anular o de doble tubo.
- Coraza y tubos (el flujo externo axial o radial a los tubos).
- Serpentin, tubo helicoidal, bayoneta - coraza.

IC de placas (PHE)

- Placas planas, corrugadas, en laminillas o en espiral.
- Con empaques, grabadas o soldadas.

IC aleteados, para incrementar b

- Placa aleteada.
- Tubo aleteado.
- Tubo de calor evaporador-condensador.

Regeneradores

- Matriz rotatoria.
- Matriz fija.
- Campana rotatoria.

2.4 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL ARREGLO DE LOS FLUJOS

Un paso

- Contraflujo.
- Paralelo.
- Cruzado: ambos flujos mezclados; uno mezclado; ambos flujos no mezclados.
- Separado y vuelto a encontrar (*Split*).
- Dividido (*Divided*).