

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE  
CALOR DE TUBO Y CORAZA CON RECIRCULACIÓN Y  
ENFRIAMIENTO INTEGRADO**

**Por:**

**NEILD PABLO TORREZ SANTA CRUZ**

**Proyecto de grado, modalidad de graduación: “Investigación Aplicada”,  
presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN  
MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de  
Licenciatura en Ingeniería Química.**

**Julio de 2026**  
**TARIJA-BOLIVIA**

V°B°

---

M.Sc. Ing. Fernando Erick Cortes Michel  
DECANO a.i

---

M.Sc. Arq. Roger Teran Cardozo  
VICEDECANO a.i

---

M.Sc. Ing. Rene Emilio Michel Cortes  
DIRECTOR DE CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

---

ING. DAVID BALDERRAMA PAREDES

---

ING. FABRICIO CAMPERO VERDUN

---

ING. JUAN CARLOS VEGA KNEZ

**Advertencia**

El tribunal calificador del presente proyecto, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo ellos únicamente responsabilidad del autor.

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi familia, a mi madre Lilian que siempre estuvo y estará dispuesta a ayudarme en todo, siendo el ejemplo de madre y mujer que es. A mi padre Freddy que dedico el mismo tiempo en colaborarme con este trabajo, sin su ayuda y conocimientos este trabajo jamás hubiera sido posible de realizar, siendo un ejemplo de padre y hombre a seguir. Y por último a mi mascota Fluky, por siempre acompañarnos y darnos esa alegría en el hogar.

Dedico este trabajo a mis amigos Andrea, Carlos y Vianka, por demostrarme que la lealtad y la familia no necesariamente es de sangre, por ser las personas con las cuales puedo contar a pesar de los problemas, tiempo y distancia.

Dedico este trabajo a mis amigos y hermanos que hicieron de mi vida universitaria la mejor etapa, a Sebastián, Fernando, Samuel, Moises, Adrián y Dan, quienes demostraron estar ahí en las buenas, pero sobre todo en las malas, con su apoyo, amistad y lealtad incondicional.

### **Agradecimientos**

Agradezco a mis padres por todo el apoyo que se me ha dado en toda mi formación académica y personal.

A los docentes que comparten su conocimiento y sabiduría.

Y expresar un especial agradecimiento al Tribunal Calificador, por su tiempo, disposición y valiosas observaciones que contribuyeron al perfeccionamiento de este trabajo de tesis.

### **Pensamiento**

“El conocimiento es poder y yo adoro el poder”

Anónimo

## **CONTENIDO**

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| Advertencia.....      | i   |
| Dedicatoria.....      | ii  |
| Agradecimientos ..... | v   |
| Pensamiento .....     | vi  |
| Resumen.....          | vii |

## **INTRODUCCIÓN**

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Antecedentes.....             | 1 |
| Objetivos.....                | 3 |
| Objetivo general.....         | 3 |
| Objetivos Especificos .....   | 3 |
| Justificación .....           | 4 |
| Justificación económica.....  | 4 |
| Justificación Social .....    | 5 |
| Justificación Técnica.....    | 5 |
| Justificación Ambiental ..... | 6 |
| Justificación Personal .....  | 6 |

## **CAPÍTULO I**

### **MARCO TEÓRICO**

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Fundamentos De La Transferencia De Calor .....      | 8  |
| 1.2. Mecanismos De La Transmisión De Calor .....         | 8  |
| 1.3. Equipos De Transferencia De Calor.....              | 12 |
| 1.4. Tipos De Intercambiadores De Calor.....             | 12 |
| 1.5. Mecanismos De Flujo De Transferencia De Calor ..... | 16 |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.6. Análisis de los intercambiadores de calor .....                              | 17 |
| 1.7. Fuerza impulsora.....                                                        | 19 |
| 1.8. Fuerza impulsora para intercambiadores de calor de tubo y coraza (1-2) ..... | 22 |
| 1.9. Coeficiente total de transferencia de calor U .....                          | 25 |
| 1.10. Resistencia total de transferencia calor .....                              | 27 |
| 1.11. Temperatura calórica .....                                                  | 29 |
| 1.12. Factor de ensuciamiento.....                                                | 30 |
| 1.13. La temperatura de la pared del tubo.....                                    | 34 |
| 1.14. Viscosidad dinámica en los fluidos .....                                    | 36 |
| 1.15. Densidad.....                                                               | 37 |
| 1.16. Conductividad térmica .....                                                 | 39 |
| 1.17. Intercambiadores de calor de tubos y coraza .....                           | 40 |
| 1.18. Clasificación TEMA para intercambiadores de calor de tubo y coraza .....    | 43 |
| 1.19. Tipos de arreglos de tubos.....                                             | 45 |
| 1.20. Tubos y pasos por los tubos .....                                           | 46 |
| 1.21. Material de tubos.....                                                      | 47 |
| 1.22. Geometría de un intercambiador de calor de tubo y coraza.....               | 48 |
| 1.23. Deflectores .....                                                           | 48 |
| 1.24. Diseño del tubo .....                                                       | 51 |
| 1.25. Asignación de corrientes .....                                              | 52 |
| 1.26. Diseño por el método de Kern .....                                          | 54 |
| 1.27. Desarrollo matemático del área de la coraza.....                            | 54 |
| 1.28. Desarrollo matemático de los tubos .....                                    | 57 |
| 1.29. Diseño por el método de Bell-Delaware .....                                 | 60 |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.30. Desarrollo matemático de la coraza .....                                      | 62 |
| 1.31. Desarrollo matemático de los tubos .....                                      | 76 |
| 1.32. El método $\epsilon$ -NTU para el análisis de intercambiadores de calor ..... | 78 |
| 1.33. Fundamento teórico de una torre de enfriamiento .....                         | 82 |
| 1.34. Relevancia estratégica de las torres de enfriamiento .....                    | 83 |
| 1.35. Principios de funcionamiento y termodinámica del proceso .....                | 84 |
| 1.36. Mecanismos de enfriamiento evaporativo .....                                  | 88 |
| 1.37. Clasificación tecnológica de las torres de enfriamiento.....                  | 89 |
| 1.38. Estructura de las torres de enfriamiento.....                                 | 90 |
| 1.39. Hidrodinámica y distribución del flujo .....                                  | 91 |
| 1.40. Fundamentos de transmisión de calor .....                                     | 92 |
| 1.41. Parámetros de diseño y selección termodinámica.....                           | 93 |
| 1.42. Fundamentos de la teoría de Merkel .....                                      | 95 |

## **CAPÍTULO II**

### **PARTE EXPERIMENTAL**

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1. Caracterización de fluidos a usar .....                                         | 99  |
| 2.2. Diseño de un módulo de calentamiento eléctrico en cascada por efecto joule .... | 99  |
| 2.3. Selección de materiales para el intercambiador de calor .....                   | 105 |
| 2.4. Elección y justificación de la parte metálica.....                              | 106 |
| 2.5. Elección y justificación de la coraza.....                                      | 109 |
| 2.6. Selección de método de diseño .....                                             | 110 |
| 2.7. Diseño de un intercambiador de calor de tubos y coraza.....                     | 112 |
| 2.8. Selección de corrientes.....                                                    | 112 |
| 2.9. Datos de diseño a partir de una bomba comercial.....                            | 112 |
| 2.10. Datos de flujos del intercambiador de calor de tubo y coraza .....             | 115 |

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.11. Características de los fluidos.....                                                                | 118 |
| 2.12. Fuerza impulsora o LMDT.....                                                                       | 119 |
| 2.13. Diseño térmico de un intercambiador de calor de tubo y coraza por el método de Bell-Delaware ..... | 119 |
| 2.14. Desarrollo matemático del área de la coraza.....                                                   | 119 |
| 2.15. Diseño termico .....                                                                               | 119 |
| 2.16. Desarrollo matemático del área de los tubos.....                                                   | 124 |
| 2.17. Diseño térmico .....                                                                               | 124 |
| 2.18. Cálculo de la longitud del intercambiador de calor de tubo y coraza .....                          | 126 |
| 2.19. Diseño hidráulico .....                                                                            | 127 |
| 2.20. Cálculo de la caída de presión de la coraza.....                                                   | 127 |
| 2.21. Cálculo de caída de presión en los tubos .....                                                     | 130 |
| 2.22. Diseño de una torre de enfriamiento por el método de Merkel.....                                   | 130 |
| 2.23. Definición de parámetros de diseño.....                                                            | 130 |
| 2.24. Curva de equilibrio y línea de operación mínima .....                                              | 132 |
| 2.25. Cálculo del número de unidades de transferencia.....                                               | 136 |
| 2.26. Cálculo de altura de una unidad de transferencia.....                                              | 138 |
| 2.27. Cálculo de la altura del empaque de la torre de enfriamiento.....                                  | 138 |
| 2.28. Rendimiento teórico .....                                                                          | 138 |
| 2.29. Diseño de un banco de pruebas.....                                                                 | 138 |

### **CAPÍTULO III**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Resultados de pruebas experimentales en el intercambiador de calor de tubos y coraza ..... | 145 |
| 3.2. Prueba experimental configuración 1-1 en contracorriente .....                             | 145 |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3. Prueba experimental configuración 1-1 en paralelo.....                     | 153 |
| 3.4. Prueba experimental configuración 1-2 .....                                | 158 |
| 3.5. Análisis de resultados del intercambiador de calor de tubos y coraza ..... | 168 |
| 3.6. Evaluación experimental torre de enfriamiento .....                        | 171 |
| 3.7. Análisis económico .....                                                   | 173 |
| 3.8. Banco de pruebas .....                                                     | 174 |
| 3.9. Intercambiador de calor de tubos y coraza.....                             | 176 |
| 3.10. Costos torre de enfriamiento .....                                        | 178 |

## **CAPÍTULO IV**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 4.1. Conclusiones .....   | 181 |
| 4.2. Recomendaciones..... | 182 |

## **BIBLIOGRAFÍA**

|                    |     |
|--------------------|-----|
| Bibliografía ..... | 185 |
|--------------------|-----|

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1 Transferencia por conducción .....                   | 9  |
| Figura 1-2 Transferencia a través de un material .....          | 9  |
| Figura 1-3 Transferencia por conducción .....                   | 10 |
| Figura 1-4 Transferencia por radiación .....                    | 11 |
| Figura 1-5 Flujos .....                                         | 13 |
| Figura 1-6 Intercambiador de placas.....                        | 14 |
| Figura 1-7 Intercambiador de doble tubo.....                    | 14 |
| Figura 1-8 Intercambiador de calor de tubo y coraza (2-4) ..... | 15 |
| Figura 1-9 mecanismos de flujo de transferencia de calor.....   | 16 |
| Figura 1-10 Mecanismo en contracorriente o paralelo .....       | 21 |
| Figura 1-11 intercambiador de calor de doble tubo .....         | 25 |

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1-12 Sistema de transmisión de calor .....                           | 25  |
| Figura 1-13 Corte de un intercambiador de doble tubo .....                  | 26  |
| Figura 1-14 gráfica kern.....                                               | 30  |
| Figura 1-15 factor de ensuciamiento.....                                    | 31  |
| Figura 1-16 coeficiente pelicular .....                                     | 35  |
| Figura 1-17 intercambiadores de calor de tubo y coraza múltiples pasos..... | 40  |
| Figura 1-18 clasificación TEMA .....                                        | 43  |
| Figura 1-19 Haz de tubos en “U” .....                                       | 45  |
| Figura 1-20 Haz de tubos rectos sobre placa tubular fija.....               | 45  |
| Figura 1-21 Cabezal flotante.....                                           | 46  |
| Figura 1-22 Geometría de un intercambiador de calor de tubo y coraza .....  | 48  |
| Figura 1-23 Espejos.....                                                    | 49  |
| Figura 1-24 diseño del tubo.....                                            | 51  |
| Figura 1-25 Área de Flujo Transversal.....                                  | 55  |
| Figura 1-26 Sección de flujo transversal puro .....                         | 62  |
| Figura 1-27 Sección de flujo en la ventana del deflector.....               | 63  |
| Figura 1-28 Ángulo de corte del deflector .....                             | 63  |
| Figura 1-29 Área bruta de la ventana.....                                   | 64  |
| Figura 1-30 Área ocupada por los tubos .....                                | 64  |
| Figura 1-31 Sección de fuga tubo-deflector.....                             | 65  |
| Figura 1-32 Sección de fuga coraza-deflector .....                          | 66  |
| Figura 1-33 Sección de derivación o bypass del haz .....                    | 67  |
| Figura 2-1 sensor de temperatura.....                                       | 139 |
| Figura 2-2 sensor de flujo .....                                            | 140 |
| Figura 2-3 Manómetro analógico.....                                         | 140 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1-1 Componentes de un intercambiador de calor de tubos y coraza ..... | 42 |
| Tabla 1-2 Clasificación TEMA .....                                          | 44 |
| Tabla 1-3 Material de tubos.....                                            | 47 |

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1-4 Comparación entre deflectores .....                                                 | 49  |
| Tabla 1-5 Diseño del tubo .....                                                               | 51  |
| Tabla 1-6 Asignación de corrientes .....                                                      | 53  |
| Tabla 1-7 Constantes para arreglo triangular de 60° .....                                     | 70  |
| Tabla 1-8 Análisis comparativo: flujo cruzado vs. contracorriente.....                        | 92  |
| Tabla 1-9 Condiciones ambientales de Tarija en verano .....                                   | 94  |
| Tabla 2-1 Especificación técnica de ducha eléctrica .....                                     | 101 |
| Tabla 2-2 Resultados de transferencia de calor por unidad.....                                | 102 |
| Tabla 2-3 Resultados de transferencia de calor por 2 unidades .....                           | 103 |
| Tabla 2-4 Selección de material para la parte metálica .....                                  | 107 |
| Tabla 2-5 Dimensiones para los tubos del haz .....                                            | 108 |
| Tabla 2-6 Dimensiones para los cabezales.....                                                 | 108 |
| Tabla 2-7 Ficha técnica del acero inoxidable 304 .....                                        | 108 |
| Tabla 2-8 Selección de material para la coraza y visores.....                                 | 110 |
| Tabla 2-9 Selección de método de diseño para el intercambiador de calor de tubos coraza ..... | 111 |
| Tabla 2-10 Datos geométricos del intercambiador de calor .....                                | 114 |
| Tabla 2-11 Características de fluidos de proceso .....                                        | 117 |
| Tabla 2-12 Coeficientes para Factor de Fricción Ideal (fi) - Arreglo triangular .....         | 127 |
| Tabla 2-13 Curva de equilibrio .....                                                          | 133 |
| Tabla 2-14 Línea de operación mínima.....                                                     | 133 |
| Tabla 2-15 Resolución de integral por el método de los trapecios .....                        | 137 |
| Tabla 2-16 Selección de tuberías para todo el sistema de intercambio de calor .....           | 142 |
| Tabla 2-17 Selección de válvulas para el sistema hidráulico .....                             | 143 |
| Tabla 3-1 Datos de proceso 1 .....                                                            | 145 |
| Tabla 3-2 Comparación temperatura vs caudal .....                                             | 147 |
| Tabla 3-3 Comportamiento caudal vs efectividad.....                                           | 148 |
| Tabla 3-4 Comportamiento temperatura vs efectividad.....                                      | 149 |
| Tabla 3-5 Datos de proceso 2 .....                                                            | 150 |
| Tabla 3-6 Datos del proceso 3 .....                                                           | 153 |

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 3-7 Datos del proceso 4.....                              | 156 |
| Tabla 3-8 Datos del proceso 5.....                              | 158 |
| Tabla 3-9 Datos de proceso 6.....                               | 162 |
| Tabla 3-10 Comportamiento temperatura vs caudal .....           | 165 |
| Tabla 3-11 Comportamiento caudal vs efectividad.....            | 166 |
| Tabla 3-12 Comportamiento temperatura vs efectividad .....      | 167 |
| Tabla 3-13 Análisis de resultados según configuración .....     | 169 |
| Tabla 3-14 Datos de proceso 7.....                              | 171 |
| Tabla 3-15 Datos del ambiente de laboratorio del LOU .....      | 172 |
| Tabla 3-16 Transporte y servicios técnicos requeridos .....     | 174 |
| Tabla 3-17 Subsistema hidráulico .....                          | 174 |
| Tabla 3-18 Subsistema Eléctrico y de Potencia .....             | 175 |
| Tabla 3-19 Subsistema de tomas de datos e Instrumentación ..... | 175 |
| Tabla 3-20 Estructura .....                                     | 176 |
| Tabla 3-21 Estructura Principal.....                            | 176 |
| Tabla 3-22 Tratamiento Superficial y Acabados .....             | 177 |
| Tabla 3-23 Estructura principal.....                            | 178 |
| Tabla 3-24 Fijación, Sellado y Acabados.....                    | 178 |
| Tabla 3-25 Ventilación y Distribución .....                     | 178 |
| Tabla 3- 26 Presupuesto global .....                            | 179 |

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfica 2-1 LMDT de diseño.....                                  | 119 |
| Gráfica 2-2 Curva de equilibrio y línea de operación mínima..... | 134 |
| Gráfica 2-3 Curva de equilibrio y línea de operación .....       | 136 |
| Gráfica 3-1 LMDT proceso 1.....                                  | 146 |
| Gráfica 3-2 Comparación temperatura vs caudal.....               | 148 |
| Gráfica 3-3 Comportamiento caudal vs efectividad.....            | 149 |
| Gráfica 3-4 Comportamiento temperatura vs efectividad.....       | 150 |
| Gráfica 3-5 LMDT proceso 2.....                                  | 151 |

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfica 3-6 LMDT proceso 3.....                              | 154 |
| Gráfica 3-7 LMDT Proceso 4 .....                             | 157 |
| Gráfica 3-8 LMDT proceso 5.....                              | 160 |
| Gráfica 3-9 LMDT proceso 6.....                              | 163 |
| Gráfica 3-10 Comportamiento temperatura vs caudal .....      | 165 |
| Gráfica 3-11 Comportamiento efectividad vs caudal.....       | 166 |
| Gráfica 3-12 Comportamiento temperatura vs efectividad ..... | 168 |

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

### NOMENCLATURA, ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA UTILIZADA

| Símbolo /<br>Nomenclatura | Término                                      | Unidad típica       |
|---------------------------|----------------------------------------------|---------------------|
| Q                         | Flujo de calor / calor transferido           | W                   |
| U                         | Coeficiente global de transferencia de calor | W/m <sup>2</sup> ·K |
| hi                        | Coeficiente convectivo interno               | W/m <sup>2</sup> ·K |
| ho o he                   | Coeficiente convectivo externo               | W/m <sup>2</sup> ·K |
| A                         | Área de transferencia de calor               | m <sup>2</sup>      |
| Ai                        | Área interna de tubos                        | m <sup>2</sup>      |
| Ao                        | Área externa de tubos                        | m <sup>2</sup>      |
| L                         | Longitud del tubo                            | m                   |
| di                        | Diámetro interno del tubo                    | m                   |
| de                        | Diámetro externo del tubo                    | m                   |
| De                        | Diámetro de coraza                           | m                   |
| k                         | Conductividad térmica                        | W/m·K               |
| Δ x                       | Espesor de pared                             | m                   |
| ΔT                        | Diferencia de temperatura                    | K o °C              |
| ΔT LMTD                   | Diferencia media logarítmica de temperatura  | K o °C              |
| F                         | Factor de corrección LMTD                    | adimensional        |
| Rd                        | Factor de ensuciamiento                      | m <sup>2</sup> ·K/W |
| Rdi                       | Ensuciamiento interno                        | m <sup>2</sup> ·K/W |
| Rdo                       | Ensuciamiento externo                        | m <sup>2</sup> ·K/W |
| m                         | Flujo másico                                 | kg/s                |
| Cp                        | Calor específico                             | J/kg·K              |

| <b>Símbolo /<br/>Nomenclatura</b> | <b>Término</b>                            | <b>Unidad típica</b> |
|-----------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|
| $\rho$                            | Densidad                                  | kg/m <sup>3</sup>    |
| $\mu$                             | Viscosidad dinámica                       | Pa·s                 |
| $v$                               | Velocidad del fluido                      | m/s                  |
| Re                                | Número de Reynolds                        | adimensional         |
| Pr                                | Número de Prandtl                         | adimensional         |
| Nu                                | Número de Nusselt                         | adimensional         |
| $f$                               | Factor de fricción                        | adimensional         |
| $\Delta P$                        | Caída de presión                          | Pa                   |
| Nt                                | Número de tubos                           | —                    |
| Pt                                | Pitch o paso entre tubos                  | m                    |
| B                                 | Espaciamiento entre deflectores           | m                    |
| Bc                                | Corte de deflector                        | % o m                |
| NTU                               | Número de unidades de transferencia       | adimensional         |
| $\varepsilon$                     | Efectividad del intercambiador            | adimensional         |
| Cmin                              | Capacidad calorífica mínima               | W/K                  |
| Cmax                              | Capacidad calorífica máxima               | W/K                  |
| R                                 | Relación de capacidades térmicas          | adimensional         |
| P                                 | Efectividad de temperatura                | adimensional         |
| T1                                | Temperatura de entrada de fluido caliente | °C o K               |
| T2                                | Temperatura de salida del fluido caliente | °C o K               |
| t1                                | Temperatura de entrada de fluido frío     | °C o K               |
| t2                                | Temperatura de salida del fluido frío     | °C o K               |
| L                                 | Flujo másico de agua                      | kg/s                 |
| (G)                               | Flujo másico de aire                      | kg/s                 |

| <b>Símbolo /<br/>Nomenclatura</b> | <b>Término</b>                                                | <b>Unidad típica</b>           |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| T1                                | Temperatura entrada agua                                      | °C                             |
| T2                                | Temperatura salida agua                                       | °C                             |
| Tbh                               | Temperatura de bulbo húmedo                                   | °C                             |
| R                                 | Rango de enfriamiento                                         | °C                             |
| A                                 | Aproximación térmica                                          | °C                             |
| KaY                               | Característica de Merkel                                      | adimensional                   |
| NTU                               | Número de unidades de transferencia                           | adimensional                   |
| AUT                               | Altura de unidad de transferencia                             | m                              |
| Z                                 | Altura del relleno                                            | m                              |
| H                                 | Entalpía del aire húmedo                                      | kJ/kg                          |
| a                                 | Área interfacial específica                                   | m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> |
| Ka                                | Coefficiente global de transferencia de masa                  | kg/m <sup>3</sup> ·s           |
| Y'                                | Humedad absoluta                                              | kg vapor/kg aire<br>seco       |
| n                                 | Eficiencia                                                    | %                              |
| hid                               | Coefficiente ideal de transferencia en coraza                 | W/m <sup>2</sup> ·K            |
| Jc                                | Factor de corrección por configuración de<br>flujo en ventana | adimensional                   |
| Jl                                | Factor de corrección por fugas de flujo                       | adimensional                   |
| Jb                                | Factor de corrección por bypass del haz<br>tubular            | adimensional                   |
| Jr                                | Factor de corrección para flujo laminar                       | adimensional                   |
| Js                                | Factor de corrección por espaciado<br>desigual de deflectores | adimensional                   |

| <b>Símbolo /<br/>Nomenclatura</b> | <b>Término</b>                                           | <b>Unidad típica</b> |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------|
| Sm                                | Área de flujo principal en coraza                        | m <sup>2</sup>       |
| Sb                                | Área de bypass entre haz y coraza                        | m <sup>2</sup>       |
| Sl                                | Área total de fugas                                      | m <sup>2</sup>       |
| Ssb                               | Área de fuga entre deflector y coraza                    | m <sup>2</sup>       |
| Stb                               | Área de fuga entre tubos y deflector                     | m <sup>2</sup>       |
| Rl                                | Relación de áreas de fuga                                | adimensional         |
| Rb                                | Relación de bypass                                       | adimensional         |
| Lb                                | Longitud efectiva de bypass                              | m                    |
| Lc                                | Longitud del corte del deflector                         | m                    |
| Fw                                | Fracción de tubos en ventana                             | adimensional         |
| Fc                                | Fracción de flujo cruzado                                | adimensional         |
| $\theta_{ctl}$                    | Ángulo central para cálculo geométrico del<br>haz        | rad                  |
| N tcw                             | Número de tubos en ventana del deflector                 | —                    |
| Nc                                | Número de filas de tubos atravesadas en<br>flujo cruzado | —                    |
| $\Delta P_c$                      | Caída de presión en sección de flujo<br>cruzado          | Pa                   |
| $\Delta P_w$                      | Caída de presión en ventana del deflector                | Pa                   |
| $\Delta P_e$                      | Caída de presión entrada/salida                          | Pa                   |
| $f_i$                             | Factor de fricción ideal                                 | adimensional         |
| Sw                                | Área de flujo en ventana                                 | m <sup>2</sup>       |
| C`                                | Holgura mecánica (clearance)                             | m                    |
| Tb                                | Espesor del deflector                                    | m                    |