

Ensayo expositivo

Simulador didáctico en el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tubos y coraza

Educational simulator for the design and evaluation of shell and tube heat exchangers

Alfonso Flores-Meza¹, Lizbeth Contreras-Romero^{1*}
Sergio Juárez-Vázquez¹, Sandro Acevedo-Zapata¹

¹Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec

*Autor de correspondencia:
lizbetha2009@live.com.mx

Recibido:03-03-2024 Aceptado: 18-12-2025 (Artículo Arbitrado)

Resumen

En la industria química, el acondicionamiento térmico de las corrientes de proceso es de vital importancia. Su estudio es un factor primordial. Su aplicación a nivel industrial reduce costos y optimiza el calor disponible en los procesos. El simulador didáctico de uso gratuito y de caja abierta para intercambiadores de calor de tubos y carcasa, "Shell and tube heat exchanger, Bell Delaware Method 1.0", implementa la metodología corta de Bell Delaware. Está diseñado en la plataforma Apache NetBeans, mediante la programación orientada a objetos utilizando el lenguaje de programación Java developed kit versión 17 y Java Runtime Environment versión 13.1. La validación de los resultados de la capacidad de cálculo del programa se realiza mediante la reproducción de ejemplos bibliográficos, comparando el error del simulador con los cálculos reportados. El resultado es un simulador interactivo de enseñanza-aprendizaje cuya finalidad es incrementar la eficacia en la transmisión y adquisición del conocimiento, implementando las tecnologías de información y comunicación en la educación. El diseño de este software como herramienta de aprendizaje está orientado a alumnos y profesores de universidad que requieran dimensionar un intercambiador de calor o evaluar un equipo existente. Permite visualizar de manera gráfica la secuencia de pasos en el cálculo del diseño térmico e hidráulico, así como variar los parámetros para analizar los efectos de las variables en el desempeño de los intercambiadores de calor.

Palabras clave: Simulación, software gratuito, enseñanza-aprendizaje, estudiante, docente.

Abstract

In the chemical industry, the thermal conditioning of process streams is of vital importance, hence its study is a primary factor; its application at an industrial level reduces costs and optimizes the heat available in the processes; The free-to-use, open-box educational simulator for shell and tube heat exchangers, "Shell and tube heat exchanger, Bell Delaware Method 1.0", implements the short Bell Delaware methodology, is designed on the Apache NetBeans platform, using object-oriented programming using the Java developed kit version 17 programming language and Java Runtime Environment version 13.1 and validating the results of the program's calculation capacity by reproducing bibliographic examples comparing the simulator error with the reported calculations. The result is an interactive teaching-learning simulator whose purpose is to increase effectiveness in the transmission and acquisition of knowledge, implementing information and communication technologies in education. The design of this software as a learning tool is aimed at university students and professors who need to size a heat exchanger or evaluate existing equipment, allowing graphical visualization of the sequence of steps in the calculation of the thermal and hydraulic design, as well as vary the parameters to analyze the effects of the variables on the performance of the heat exchangers.

Keywords: Simulation, free software, teaching-learning, student, teacher.

Introducción

La enseñanza de intercambiadores de calor ha cambiado de un enfoque puramente analítico basado en métodos como el LMTD (Diferencia de Temperatura Media Logarítmica) o el NTU (Efectividad-Número de Unidades de Transferencia) hacia el uso de herramientas digitales para la enseñanza de las metodologías propias del tema. Los simuladores de Los

simuladores son esenciales para realizar análisis de sensibilidad de condiciones tanto de operación como de diseño, por ejemplo, temperatura y caudales de entrada a los tubos y coraza, número y longitud de tubos, número de pasos, diámetro externo e interno de los tubos, diámetro interno de coraza y factor de ensuciamiento, etc. Heat Transfer Fluid Flow Service

(HTFS) en el Reino Unido, y el Heat Transfer Research Institute (HTRI) en los Estados Unidos fueron los primeros desarrollados en la década del 60. Existe Software Comercial (Caja Negra): Como Aspen HYSYS o HTRI, utilizados para diseño industrial riguroso. Entornos de Programación (Caja Blanca): Uso de Python, MATLAB o Excel/VBA donde el estudiante programa las ecuaciones fundamentales. Simuladores Interactivos y CFD: Herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (como ANSYS Fluent) que muestran la distribución detallada de presiones y temperaturas (Gregorio et al., n.d.; Machuca & Urresta, 2008), (Kariimi, 2008), (Smith & Pollard, 1986). No obstante, el uso de un programa profesional puede ser complejo, requiere experiencia y conocimientos sobre el comportamiento de un equipo, la elección del mejor diseño y la selección de un programa específico (Cartaxo & Fernández, 2010), Por ello el objetivo de este trabajo es un programa de ingeniería para el cálculo de intercambiadores de calor en los cuales en su interior se transportan fluidos monofásicos en estado líquido. El empleo de este software es para uso universitario, es una importante mejora educativa que permite reducir el tiempo dedicado a largos cálculos manuales, en afianzar conceptos teórico-prácticos mediante análisis de resultados y de sensibilidad paramétrica (Blasetti et al., 2013), así como ejercitar el proceso de toma de decisiones o desarrollar criterios de ingeniería.

Metodología

Bell-Delaware y su algoritmo estructurado

El método de cálculo empleado fue el Método Bell Delaware aún vigentes en el cálculo de correlaciones empíricas para el coeficiente de transferencia de calor y de factor de fricción en el flujo perpendicular a los bancos de tubos (Blasetti et al., 2013; Serna & Jiménez, 2005). Según Mendoza, 2018 los resultados demuestran que la correlación que tiene una mejor aproximación al comportamiento experimental es la de Delaware, puesto que existe un mejor cálculo para determinar el área de flujo cruzado a lo largo de la línea central de flujo, además para la evaluación del coeficiente de transferencia de calor considera distintos factores de corrección, tales como: los efectos de derivación, fugas y flujos en los espaciamientos.

En el procedimiento de diseño, la metodología de Bell-Delaware supone que se especifican el flujo

másico, temperaturas de entrada y salida del fluido del lado de la coraza y de los tubos, caída de presión permisible, factor de ensuciamiento, propiedades tales como densidad, capacidad calorífica, viscosidad y conductividad térmica. La aplicación del algoritmo de diseño proporciona los siguientes resultados: longitud del tubo, área de transferencia de calor, número de tubos, número de baffles, espacio de baffles, diámetro de coraza, coeficiente de transferencia de calor del lado del tubo y de la coraza.

Los cálculos terminan cuando se identifica el diseño que satisface tres requisitos principales:

1. Transfiere la carga térmica requerida.
2. La caída de presión de fluido del tubo es menor que el valor permisible.
3. La caída de presión del fluido de la coraza es menor que el valor permisible.

Desarrollo del Software en la Plataforma de Apache NetBeans

La plataforma para el desarrollo de este software fue Apache NetBeans IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) de código abierto y gratuito. Es un editor de código fuente, con recursos de construcción automáticos y un depurador; además, ofrece un compilador y un intérprete. NetBeans trabaja con Java, que es un lenguaje multiplataforma que permite integrar los lenguajes de programación con las plataformas correspondientes a los sistemas operativos o entornos de programación. Esto facilita el proceso de diseño como la actualización, compilación, depuración, prueba, junto con la fase de implementación de aplicaciones de escritorio, web o móviles, especialmente dirigido para la creación de aplicaciones por medio del lenguaje de programación JavaFX (Quispe Andía et al., 2023). En el contexto de los gráficos, JavaFX proporciona un conjunto de gráficos predefinidos, cada uno de los cuales se puede animar, lo que es particularmente útil para mostrar los cambios en los valores presentados en un gráfico.

Módulos

Se recomienda que la información de entrada para cualquier módulo de cálculo debe ser adecuada de acuerdo a la configuración del sistema y a las condiciones de operación con la finalidad de evitar resultados sobrestimados o inexactos. Para ello el software consta de tres módulos de cálculo.

Módulo I: Simulación

Permite calcular el Área de Transferencia de Calor en los Tubos, de acuerdo a las condiciones de servicio y a la configuración de su geometría. La simulación puede ser adecuada para diferentes fluidos, a diferentes temperaturas y a diferentes caudales, lo anterior se realiza teniendo como variables conocidas la capacidad calorífica de ambos fluidos, la longitud de los tubos, número de los tubos y el diámetro externo de los tubos, ver Figura 1.

Módulo II: Evaluación

En este módulo se encuentran implícitos tres submódulos que son utilizados para realizar la evaluación que así se requiera. (ver Figura 2).

1. Módulo de evaluación de la variación del coeficiente de transferencia de calor en los tubos (h_i) al variar el número de pasos. Realiza la evaluación de la variación del h_i al variar el número de pasos, además de proporcionar los diferentes valores del número de Reynolds, flujo másico y de la velocidad promedio en los tubos al finalizar la ejecución del programa en función al valor del número de pasos seleccionados.

2. Módulo de evaluación para determinar si el intercambiador es térmicamente adecuado (ver Figura 3). Para realizar lo anterior es necesario además de conocer las variables antes mencionadas conocer el material de construcción de los tubos y de la coraza, la conductividad térmica de los materiales de construcción en la coraza, el valor y el tipo de arreglo, la disposición de los fluidos (paralelo o contracorriente), el diámetro interno de la coraza y el diámetro interno y externo de los tubos. Con estos valores el programa proporcionará el coeficiente global de transferencial de calor requerido de diseño limpio, así como el valor del sobre diseño y sobre dimensionamiento.

3. Módulo de evaluación para determinar si el intercambiador es hidráulicamente adecuado (ver Figura 4). Es necesario además de conocer las variables antes mencionadas conocer el valor de la caída de presión máxima para ambos fluidos empleados. En base a estos valores iniciales al finalizar la ejecución del programa se obtendrán como resultados el coeficiente global de transferencial de calor requerido de diseño, el valor del sobre diseño y sobre dimensionamiento y el valor de las caídas de presión por fricción, en los cabezales y en las boquillas para los tubos y la coraza.

Módulo III: Diseño

Permite realizar el dimensionamiento del intercambiador de calor de Tubos y Coraza en base a los fluidos y condiciones de operación seleccionados (ver Figura 5). Este módulo es otra forma de ejecutar el programa realizado. Requiere ingresar las variables antes mencionadas como datos de entrada, durante la ejecución el software como ya se mencionó también se cuenta con ayudas, gráficas, tablas que permiten seleccionar y calcular el material de construcción de los tubos y coraza, la conductividad térmica del material de construcción en la coraza, el valor y el tipo de arreglo, la disposición de los fluidos, el diámetro interno de la coraza, el diámetro interno y externo de los tubos, y el valor de la caída de presión máxima para ambos fluidos empleados.

Se obtiene como resultado el coeficiente global de transferencial de calor requerido de diseño, así como el valor del sobre diseño y sobre dimensionamiento si es el caso, y el valor de las caídas de presión por fricción, en los cabezales y en las boquillas para los tubos y la coraza.

Resultados

La evaluación de cálculo del programa es mediante la reproducción de un ejemplo bibliográfico, problema ejemplo 5.1 de Process Heat Transfer: Principles and Applications (W. Serth Robert, 2007). La simulación se realizó con el simulador Shell and tube heat exchanger, Bell Delaware Method 1.0 (Figura 6).

Los datos a ingresar (Figura 7) deben concordar con las unidades requeridas en caso contrario se pueden convertir en el apartado de Conversiones, una vez hecho lo anterior se continua (botón “Siguiente paso”) con las Especificaciones iniciales, como colocación de los fluidos, tipos de cabezas y coraza, arreglos de los tubos y materiales de construcción.

Las estimaciones preliminares (Figuras 8a y 8b), tanto del área como del número de tubos, longitud de los tubos, número de pasos, calibre, el diámetro interno y externo de los tubos a utilizar. La relación $L/DS=8$ es un punto intermedio del rango (5 a 10), se determinó el número de Reynolds en función del número de pasos.

Se realiza el ajuste del número de tubos (Figura 9), diámetro de coraza mostrados en las tablas de diseño comercial. Se establece el espaciado de deflec-

tores a través de la gráfica disponible en el software (botón “ver figura”) en el cual dependiendo del diámetro de coraza nos brinda un corte más adecuado, (Figura 10).

Para la evaluación hidráulica se dan los datos para determinar las caídas de presión (Figura 11), realizando previamente la determinación del diámetro de la boquilla. La información previamente proporcionada es utilizada para determinar la caída de presión total en la coraza (Figura 12), culminado los cálculos térmicos e hidráulicos del intercambiador se pueden observar los datos suministrados y los resultados del diseño para su interpretación por el usuario; para ello es necesario presionar sobre el botón “Imprimir resultados”.

En los resultados obtenidos en este ejemplo (Figura 13), las cajas de texto del Sobre Diseño y la Sobre Superficie son de color rojo, los valores sobrepasaron los límites permitidos, por lo que se observa un cuadro de texto que el Simulador le proporciona al usuario para hacerle saber porque estas cajas de texto son de este color, en este caso informa que el intercambiador no es térmicamente adecuado para el servicio, no obstante brinda posibles soluciones que puede utilizar para mejorar el intercambiador térmicamente. Esto se logra al hacer ajustes en pasos anteriores lo que permite analizar diversos escenarios para cumplir los límites permitidos.

Haciendo ajustes se puede observar en la Figura 14 que se cumple con los criterios establecidos dando así a una configuración que ahora podrá ser analizada en cuanto costo, lugar de ubicación, facilidad de mantenimiento entre otras. El software es una herramienta en la que el alumno podrá plantear diferentes ajustes para así entender el efecto de cada variable del intercambiador de calor, generando así un conocimiento analítico y más profundo.

Conclusiones

El programa desarrollado permite a los estudiantes y profesores visualizar gráficamente la secuencia de pasos del cálculo de diseño térmico e hidráulico, así como variar parámetros para analizar los efectos de las variables en el desempeño del equipo. El uso de este software para fines universitarios es una mejora educativa importante que permite reducir el tiempo dedicado a largos cálculos manuales, permitiendo

enfocarse en conceptos teórico-prácticos mediante el análisis de resultados y la toma de decisiones de ingeniería. La capacidad de cálculo del programa se validó mediante la reproducción de ejemplos bibliográficos, comparando el error del simulador con los cálculos reportados, resultando en una herramienta confiable para el estudio.

Referencias

- Blasetti, A., Bertolami, M., Oriana, G., & Olivares, P. (2013). *VII CAIQ2013 y 2das JASP PRODEIC-Programa para el Diseño de Equipos de Intercambio de Calor*.
- Cartaxo, S. J. M., & Fernandes, F. A. N. (2010). Educational software for heat exchanger equipment. *Computer Applications in Engineering Education*, 18(1), 193–199. <https://doi.org/10.1002/cae.20137>
- Gregorio, J., Capetillo, H., Merced Martínez Vázquez, J., Luis, M. I., Castro, S., & Arnulfo Pérez Pérez, M. C. (n.d.). *Software educativo para analizar intercambiadores de calor tipo coraza y tubos*.
- Karimi, A. (2008). *Session 5-1 Application of Excel in Solving Heat Exchanger Problems*.
- Machuca, F., & Urresta, O. (2008). Software para la enseñanza de la dinámica y control de intercambiadores de calor de tubos y coraza. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (44), 52–60. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302008000200006&lng=e&nrm=iso&tlng=es
- Mendoza Mendoza kukultzin. (2018). *Desarrollo de un software para el diseño térmico de intercambiadores de calor*.
- Quispe Andía, A., Morales Romero, G. P., Guía Altamirano, T., & Quispe Guía, S. M. T. (2023). Lenguaje de programación Java Netbeans y aplicaciones visuales educativas. In *Lenguaje de programación Java Netbeans y aplicaciones visuales educativas*. Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle (UNE) - Fondo Editorial La Cantuta. <https://doi.org/10.54942/lacantuta.29>
- Serna, M., & Jiménez, A. (2005). A compact formulation of the Bell-Delaware method for heat exchanger design and optimization. *Chemical Engineering Research and Design*, 83(5 A), 539–550. <https://doi.org/10.1205/cherd.03192>
- Smith, P. R., & Pollard, D. (1986). The role of computer simulations in engineering education. *Computers & Education*, 10(3), 335–340. [https://doi.org/10.1016/0360-1315\(86\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0360-1315(86)90002-3)
- W.Serth Robert. (2007). *Process Heat Transfer, Principles and Applications* (ELSEVIER, Ed.; first edition). ELSEVIER.

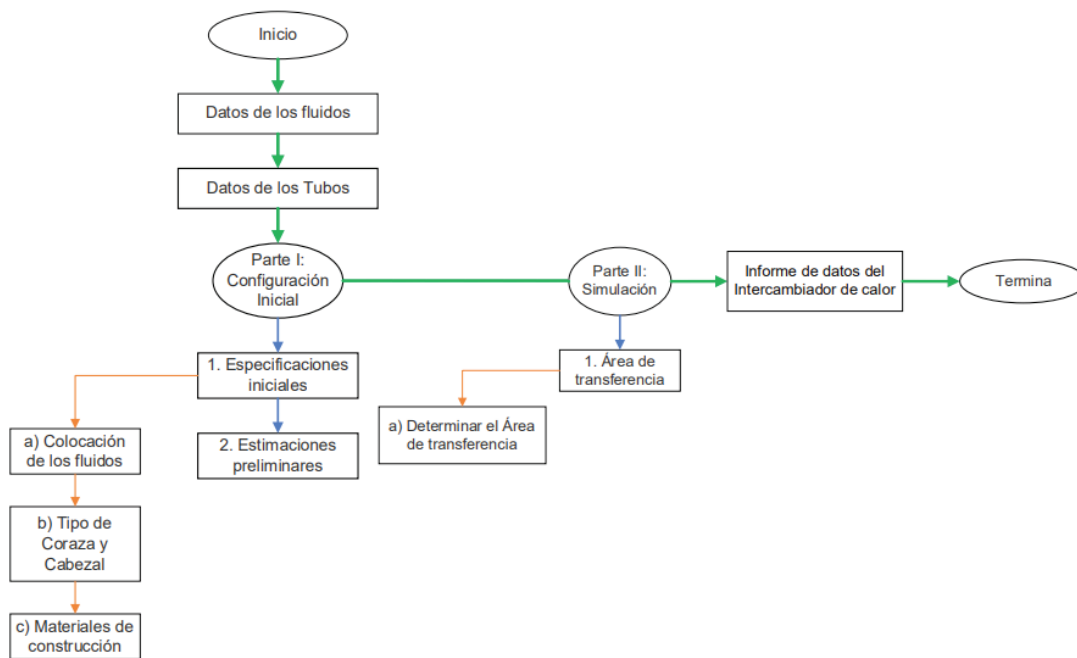


Figura 1. Diagrama de flujo para el módulo de simulación.
Fuente: Elaboración propia.

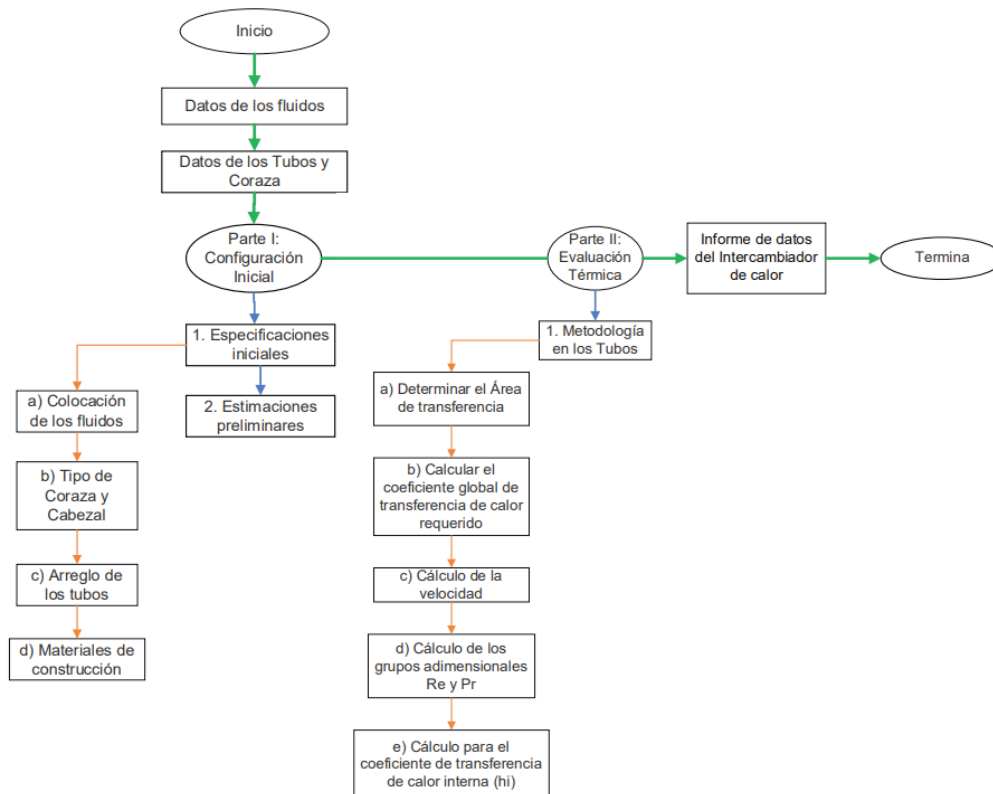


Figura 2. Diagrama de flujo para el módulo de evaluación del coeficiente de transferencia de calor en los tubos (h_i) al variar el número de pasos.
Fuente: Elaboración propia.

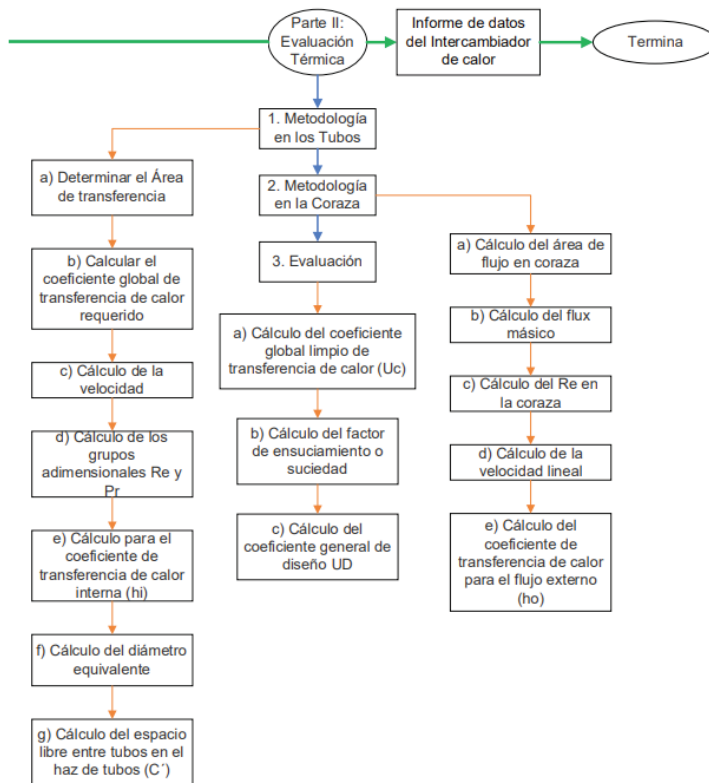


Figura 3. Diagrama de flujo para el módulo de evaluación térmica del intercambiador de calor.
Fuente: Elaboración propia.

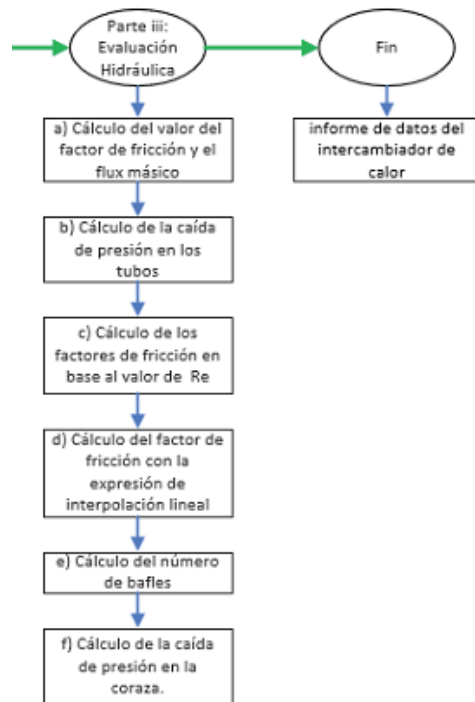


Figura 4. Diagrama de flujo para el módulo de evaluación hidráulica del intercambiador de calor.
Fuente: Elaboración propia.

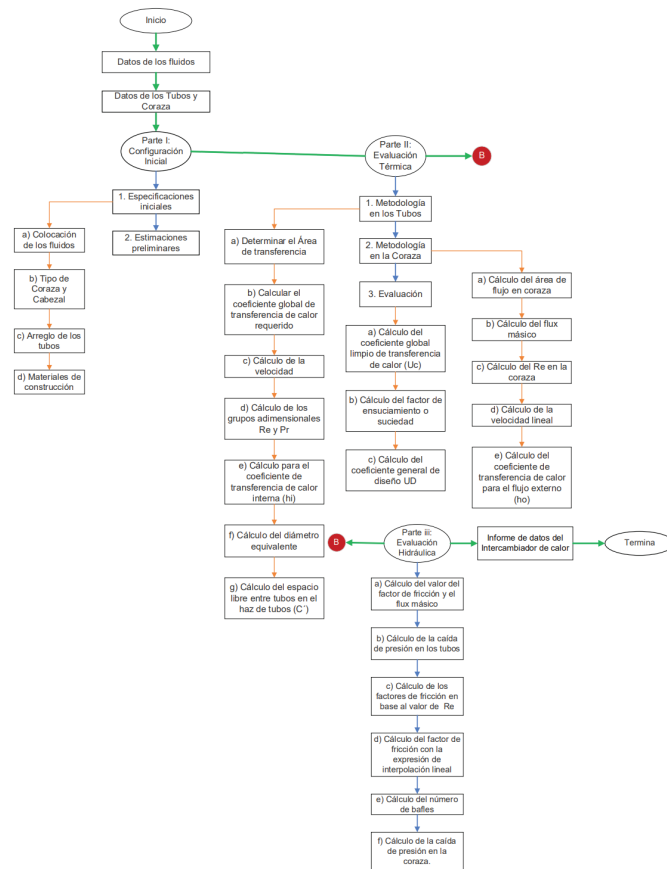


Figura 5. Diagrama de flujo para el dimensionamiento en el módulo de diseño.
Fuente: Elaboración propia.

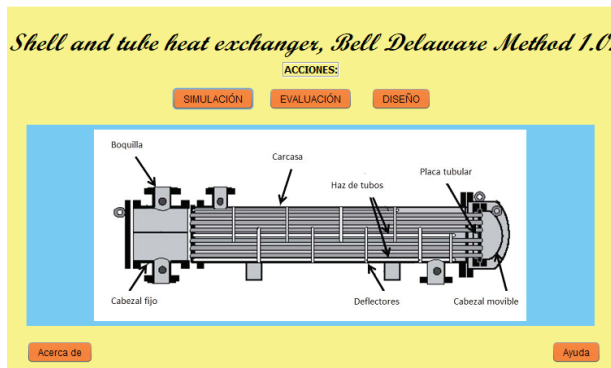


Figura 6. Pantalla principal del simulador.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Ventana donde se proporcionan los datos del problema.
Fuente: Elaboración propia.

DATOS DEL PROBLEMA:

¿Qué datos son conocidos?

- ☐ Flujo del Fluido caliente y 4 temperaturas.
- ☐ Dos flujos y tres temperaturas (dos del Fluido frío y uno del Fluido caliente).
- ☒ Dos flujos y tres temperaturas (dos del Fluido caliente y uno del Fluido frío).
- ☐ Flujo del Fluido frío y 4 temperaturas.

	Fluido Frío		Fluido Caliente		Unidades
Flujo másico:	150000	45000			lb/h
Temperatura de entrada:	T1	100	T1	390	°F
Temperatura de salida:	T2	0.0	T2	250	°F

	Fluido Frío		Fluido caliente		Unidades
Cp:	0.49	Btu/(lb. °F)	0.59	Btu/(lb. °F)	
k (conductividad):	0.077	Btu/(h.ft. °F)	0.079	Btu/(h.ft. °F)	
Viscosidad dinámica:	3.595041	cP	4.0082645	cP	
Densidad:	53.065502	lb/ft ³	49.007553	lb/ft ³	

Conversiones

De gravedad específica a densidad:

Sp: 0.85 **Adimensional**

Densidad: 53.065502 **lb/ft³**

Convertir

La viscosidad dinámica de lbm/(h.ft) a cP:

Viscosidad: 8.7 **lbm/(h.ft)**

Viscosidad: 3.595041 **cP**

Convertir

Atrás Siguiente paso

Para realizar el dimensionamiento correcto de estos equipos de procesos es importante seguir los criterios de diseño establecidos, los cuales son los siguientes:

a) COLOCACIÓN DE LOS FLUIDOS

Tubos: Crude Oil
Coraza: Kerosene

Nombre del fluido: Crude Oil Kerosene

En pasos posteriores se le preguntará ¿Qué fluido va por los tubos?, (Fluido Frio o Caliente).

Ayuda

Atrás Siguiente paso b)

b) TIPOS DE CABEZAS Y CORAZA

Tipo de:

Cabezal estacionario del extremo delantero: "A"

Coraza: "E"

Ayuda

Cabezal trasero: "S"

Distribución de flujo: Contracorriente

Atrás Siguiente paso c)

Figura 8a. Ventana de estimaciones preliminares.
Fuente: Elaboración propia.

c) ARREGLO DE LOS TUBOS

Tipo de paso: Cuadrado

Tamaño del paso (Pitch): 1.25 in

P_T: Pitch
C: Claro

Ayuda

Atrás Siguiente paso d)

d) MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Tipo de material para:

Los tubos: Acero carbono

Rango de k del material: 24 - 30 Btu/(h.ft.°F)

k (conductividad del material): 26 Btu/(h.ft.°F)

La coraza: Acero carbono

Rango de k del material: 24 - 30 Btu/(h.ft.°F)

k (conductividad del material): 26 Btu/(h.ft.°F)

Atrás Siguiente paso

ESTIMACIONES

Diámetro de la coraza (D_o): 20.930382 pulgada (in)

Longitud de tubos (L): 13.953588 ft

Conservar valor Cambiar valor

Longitud de tubos (L): 13.953588 ft

Número de tubos (N_T): 220.20343 Adimensional

Valor de Re en función del número de pasos: 1434.4103 Re

Para determinar el diámetro de la coraza a partir de la relación (L/D_o) mediante la siguiente ecuación:

$$D_o = \left[\frac{4P_T^2 L}{\pi^2 D_o (L/D_o)} \right]^{1/3}$$

Entonces la longitud de los tubos se calcula con la siguiente ecuación:

$$L = (L/D_o) D_o$$

D_o: Diámetro externo del tubo.
D_i: Diámetro interno de la coraza.
P_T: Paso de tubo o tube.

Para estimar el número de tubos a partir del diámetro de coraza se emplea la siguiente expresión:

$$N_T = \frac{\pi D_o^2}{P_T^2}$$

Para realizar el dimensionamiento correcto de los intercambiadores de calor de Tubos y Coraza y a su vez establecer un número de pasos adecuado, lo anterior debe cumplir el criterio principalmente de Re > 10000, es decir, que el flujo sea turbulento.

$$Re = \frac{4W_{tubo}(\mu_o/\mu_i)}{\pi D_o \mu}$$

El cual el valor del Re está en función del número de pasos.

Número de pasos (N_P): 6 Adimensional

Velocidad lineal en los tubos (V_T): 5.6396837 ft/s

Rango de la Velocidad lineal (V_T): 3 a 8 ft/s

Calcular

Atrás Siguiente paso

VALORES INICIALES

U_{Di}: 8 Adimensional

OO: 1 pulgada (in)

Di: 0.834 pulgada (in)

Ver Tabla

CalRe: 14 Btu

Atrás Siguiente paso

Figura 8b. Ventana de estimaciones preliminares.
Fuente: Elaboración propia.

4. AJUSTE DEL NÚMERO DE TUBOS.

Número de pasos (N_P): 6 Adimensional

Cabezal tipo: "S"

Número de tubos (N_T): 220.20343 Adimensional

Nuevo número de tubos (N_T): 212 Adimensional

Diámetro de la coraza: 25 in

Relación L/D_o: 6.6977224 Adimensional

Rango de la Relación L/D_o: 5 a 10 Adimensional

Calcular

Atrás Siguiente paso

Apéndices del libro de Serth

Tabla C-1 Tabla C-3 Tabla C-5 Tabla C-7

Table C-1 Tube Counts for 5/8-in. OD Tubes on 13/16-in. Square Pitch

Shell ID (in.) TEMA P or S

Shell ID (in.)	Number of passes			
	1	2	4	6
8	55	48	34	24
10	88	79	62	56
12	140	138	112	100
13.25	178	172	146	136
15.25	245	232	208	192
17.25	320	308	274	260
19.25	405	392	352	336
21.25	502	484	442	424
23.25	610	584	536	508
25	700	676	618	600
27	843	812	742	716
29	970	942	868	840
31	1127	1096	1014	984
33	1288	1250	1172	1148
35	1479	1438	1330	1308
37	1647	1604	1520	1480
39	1840	1794	1700	1664
42	2137	2112	2004	1968
45	2511	2458	2326	2288
48	2865	2808	2686	2656
54	3656	3600	3402	3404
60	4538	4472	4310	4256

Para seleccionar correctamente el nuevo Número de Tubos, este debe tener la menor diferencia entre el Número de Tubos Calculados.

Diámetro de la coraza (D_o): 20.930382 pulgada (in)

Número de tubos (N_T): 220.20343 Adimensional

Nuevo número de tubos (N_T): 212 Adimensional

Nuevo Diámetro de la coraza: 25 in

Calcular

Figura 9. Ventana ajuste en los tubos.
Fuente: Elaboración propia.

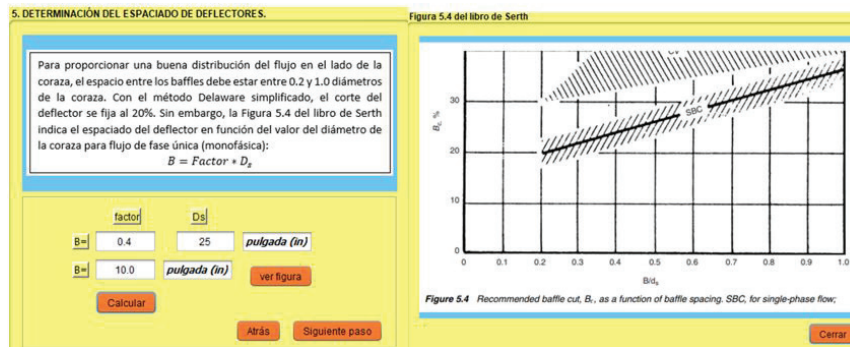


Figura 10. Ventana del espaciado de deflectores.
Fuente: Elaboración propia.

b) Cálculo de la caída de presión en los tubos

Para determinar la caída de presión en los tubos, se debe de calcular:

- Perdidas por fricción:

$$\Delta P_f = \frac{f \cdot N_p \cdot L \cdot G^2}{7.5 \times 10^{12} \cdot D_i \cdot s \cdot \phi} [=] \text{psi}$$

Donde la densidad relativa se expresa mediante la siguiente expresión:

$$s = \frac{\rho_{\text{fluido en el tubo}}}{\rho_{\text{agua}}} = 62.4 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

L: Longitud de los tubos [=] ft.
φ: Se supone que el factor de corrección de la viscosidad es la unidad ya que no se proporcionaron datos para la dependencia de la temperatura.

La caída de presión total en el tubo es:

$$\Delta P_t = \Delta P_f + \Delta P_e + \Delta P_n [=] \text{psi}$$

- Perdidas por entrada, salida y retorno o Perdidas del cabezal:

$$\Delta P_e = \frac{1.334 \times 10^{-13} (2N_p - 1.5) G^2}{s} [=] \text{psi}$$

- Perdidas por cambio de dirección:

$$Re_n = \frac{4\dot{m}}{\pi D_{in} \mu} [=] \text{Adimensional}; G_n = \frac{\dot{m}}{(\pi D_{in}^2 / 4)} [=] \text{lbm/h.ft}^2$$

En base al valor del diámetro de coraza $D_o [=]$ in y de acuerdo a la tabla 5.3 del libro *Process Heat Transfer Principles and Applications*. (Primera ed.), Serth, R. W. (2007), se obtiene el Diámetro nominal de la boquilla, en pulgadas, el diámetro interno (D_{in}) se toma del apéndice B (Table B.2 Properties of Steel Pipe) del libro *Process Heat Transfer Principles and Applications*. (Primera ed.), Serth, R. W. (2007).

$$\Delta P_n = 2.0 \times 10^{-13} N_s (G_n)^2 / s [=] \text{psi}$$

Figura 11. Ventana del cálculo de la caída de presión en los tubos.
Fuente: Elaboración propia.

f) Cálculo de la caída de presión en la coraza.

Cálculo de la caída de presión en la coraza.

- Perdidas por fricción:

$$\Delta P_f = \frac{f \cdot G^2 \cdot D_o (n_s + 1)}{7.5 \times 10^{12} \cdot de \cdot s \cdot \phi} [=] \text{psi}$$

Donde la densidad relativa se expresa mediante la siguiente expresión:

$$s = \frac{\rho_{\text{fluido en la coraza}}}{\rho_{\text{agua}}} = 62.4 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

L: Longitud de los tubos [=] ft.
φ: Se supone que el factor de corrección de la viscosidad es la unidad ya que no se proporcionaron datos para la dependencia de la temperatura de la viscosidad.

- La caída de presión total en la coraza es:

$$\Delta P_o = \Delta P_f + \Delta P_n [=] \text{psi}$$

- Perdidas por cambio de dirección:

$$Re_n = \frac{4\dot{m}}{\pi D_{in} \mu} [=] \text{Adimensional}; G_n = \frac{\dot{m}}{(\pi D_{in}^2 / 4)} [=] \text{lbm/h.ft}^2$$

En base al valor del diámetro de coraza $D_o [=]$ in y de acuerdo a la tabla 5.3 del libro *Process Heat Transfer Principles and Applications*. (Primera ed.), Serth, R. W. (2007), se obtiene el Diámetro nominal de la boquilla, en pulgadas, entonces suponiendo que la tubería es de cedula 40 (40ST, 40S), el diámetro interno (D_{in}) se toma del apéndice B (Table B.2 Properties of Steel Pipe) del libro *Process Heat Transfer Principles and Applications*. (Primera ed.), Serth, R. W. (2007).

$$\Delta P_n = 2.0 \times 10^{-13} N_s (G_n)^2 / s [=] \text{psi}$$

Figura 12. Ventana del cálculo de la caída de presión en la coraza.
Fuente: Elaboración propia.

Datos Termicos					
Área de transferencia de calor=	774.44446	ft ²	Área de flujo en coraza=	0.3472222	ft ²
Velocidad lineal en tubos=	5.8577724	ft/s	Velocidad lineal en la coraza=	0.7345807	ft/s
Re en los tubos=	8939.492	Adimensional	Re en la coraza=	11016.415	Adimensional
Pr en los tubos=	55.36	Adimensional	U requendo=	25.96739	Btu/(h.ft ² .°F)
Nusselt=	139.11365	Adimensional	ho=	64.05397	Btu/(h.ft ² .°F)
hi=	154.12592	Btu/(h.ft ² .°F)	U Diseño=	34.153618	Btu/(h.ft ² .°F)
U Limpio=	42.225533	Btu/(h.ft ² .°F)	Sobre Diseño=	31.525028	%
Sobre Superficie=	62.80984	%	Calor (Q)=	3716999.8	Btu/h
F=	0.96647495	adimensional	MLDT=	191.24205	°F
k (conductividad del material):	26	Btu/(h.ft.°F)	k (conductividad del material):	26	Btu/(h.ft.°F)

Figura 13. Resultados obtenidos con el simulador.

Fuente: Elaboración propia.

Datos Hidraulicos					
Caída de presión en tubos		Caída de presión en la coraza			
Por Fricción (DPF)=	9.313847	psi	Por Fricción (DPF)=	0.24853903	psi
Por Retorno (DPR)=	2.0625856	psi	Por Boquillas (DPB)=	0.12811461	psi
Por Boquillas (DPB)=	0.13146402		Total (DPT)=	0.26135048	psi
Total (DPT)=	11.507896	psi			

Tubos		Coraza			
Longitud de tubos (L)=	13.953588	ft	Diámetro de la coraza=	25	in
Número de tubos (Nt)=	212	Adimensional	Material de construcción:	Acero carbono	
Número de pasos (Np)=	6	Adimensional			
Diámetro externo (OD)=	1	pulgada (in)			
Diámetro interno (DI)=	0.834	pulgada (in)			
Calibre=	14	BWG			
Material de construcción:	Acero carbono				

Bafles		
Número de Bafles (NB)=	15.744305	Adimensional
% de corte=	0.4	Adimensional
B=	10.0	pulgada (in)

El intercambiador no es térmicamente adecuado:

Sobre Superficie > 40%

Sobre Diseño > 10%

Posibles soluciones:

1. Manteniendo número de pasos, diámetro de coraza y número de tubos:
 - Disminuir Longitud de tubos.
2. Manteniendo la Longitud de los tubos:
 - Disminuir el diámetro interno de la coraza.

Redimensionamiento
Terminar

Figura 14. Resultados obtenidos del redimensionamiento con el simulador.

Fuente: Elaboración propia.