

ORIGINAL

**SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CORAZA Y
TUBOS MEDIANTE EL EMPLEO DE MATLAB**

Simulation of operation of Heat Exchanger of heart and tubes through the use of MATLAB

Ing. José Felipe Báez-Matos, Profesor Instructor, Universidad de Granma, jbaezm@udg.co.cu,
Cuba

Ing. Raúl Arturo Jiménez-Rodríguez, Profesor Asistente, Universidad de Granma,
rjimenez@udg.co.cu, Cuba

Recibido: 26/11/2017- Aceptado: 28/12/2017

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en el modelo matemático y la simulación en un software apropiado del funcionamiento de un intercambiador de calor, partiendo de una breve introducción de conceptos afines al mismo, luego se analizan las ecuaciones que modelan este sistema dinámico.

Analizamos la ecuación diferencial de primer orden que modela el comportamiento del intercambiador de calor de tubos y coraza, simularemos la ecuación no lineales y observaremos su comportamiento con respecto a dos entradas de respuesta tipo escalón, luego le aplicaremos la transformada de Laplace y con ayuda de variables de desviación se logra linealizar para obtener su función de transferencia y poder confeccionar un archivo o fichero denominado simulacion.m para ser corrido con MATLAB y mostrar finalmente la gráfica del comportamiento del intercambiador, comprobando que su diseño cumple con las especificaciones técnicas necesarias y es factible pasar a la etapa de producción.

Palabras claves: simulación; modelo matemático; intercambiador de calor; transferencia

ABSTRACT

This paper is focused in the mathematical pattern and the simulation in an appropriate software of the operation of an heat exchanger, leaving of a brief introduction of concepts tunes to the same one, then the equations are analyzed that model this dynamic system.

We analyze the differential equation of first order that models the behavior of the heat exchanger of shell und tubes, we will simulate the non-lineal equation and we will observe their behavior

with regard to two entrances of answer type step, then we will apply him the one transformed of Laplace and with the help of deviation variables to obtain a lineal equation to obtain its transfer function and to make a file denominated simulacion.m to be run with MATLAB and finally to show the graph of the behavior of the heat exchanger, checking that its design fulfills the necessary technical specifications and it is feasible to pass to the production stage.

Key words: simulation; mathematical model; heat exchanger; transfer

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los intercambiadores de calor han adquirido una creciente importancia al incrementarse la consciencia de los especialistas y técnicos de la necesidad de ahorrar energía. En consecuencia se desea obtener equipos óptimos, no solo en función de un análisis térmico y rendimiento económico de lo invertido, sino también en función del aprovechamiento energético del sistema.

Intercambiador de calor: son dispositivos que permiten el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan al mismo tiempo que se mezclen entre sí. En un intercambiador la transferencia de calor suele comprender convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa (Burbano Rojas, 2014).

Los intercambiadores de calor son generalmente un medio para mantener una temperatura fija o variable (a voluntad) en un ambiente controlado, y si bien su objetivo es elevar o disminuir la temperatura en dicho ambiente, y los principios físicos y mecánicos que soportan y permiten el funcionamiento de estos dispositivos permanecen los mismos, la forma como se aprovechan estas relaciones y se utilizan sus propiedades han resultado en la creación de numerosos sistemas de distintas formas y tipologías, entre ellos, los sistemas intercambiadores de calor de coraza y tubos.

Los intercambiadores de calor difieren de las cámaras de mezcla en que no permiten que los fluidos se mezclen. En un radiador del auto, por ejemplo, el calor es transferido del agua caliente fluyendo a través de los tubos del radiador fluyendo hacia el aire a través de los platos delgados estrechamente espaciados y solidarios con los tubos.

El modelado de sistemas dinámicos trata la obtención de un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de un sistema físico real, en la predicción del comportamiento dinámico de un sistema (fase de análisis), o en su mejora en la evolución temporal (fase de diseño).

En la actualidad, cuando un nuevo producto se diseña, antes de iniciar la etapa de la realización física del sistema, este debe haber superado las pruebas de simulación, los programas de simulación predicen el comportamiento dinámico de los sistemas, los mismos se basan en el modelado matemático de los elementos que constituyen al sistema y de las señales que actúan, la validez de los simuladores depende de la aproximación que debe haber entre modelo matemático de los componentes y de sus verdaderos comportamientos físicos.

POBLACIÓN Y MUESTRA

El presente trabajo se desarrolló en la Fábrica de Conserva de frutas y vegetales del municipio Yara de la provincia de Granma.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CORAZA Y TUBOS.

Este tipo de intercambiador (fig.1) se emplea en grandes aplicaciones industriales. Contienen un gran número de tubos empacados en un casco con sus ejes paralelos al de éste. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por dentro de los tubos, por lo cual el otro se mueve por fuera de estos, pasando por el casco. Por lo general se emplean desviadores en el casco, lo cual fuerza al fluido a moverse en dirección transversal a dicho casco con el fin de mejorar la transferencia de calor, y también para mantener un espacio uniforme entre los tubos (Burbano Rojas, 2014).

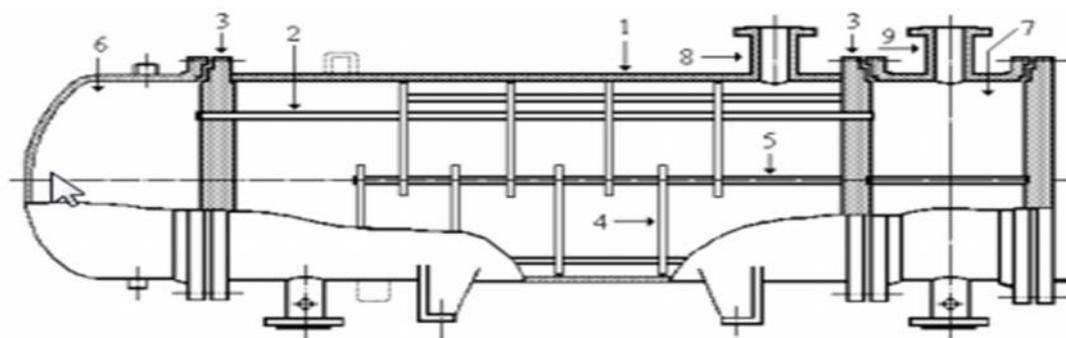


Fig. 1. Intercambiador de calor de carcasa y tubos de 1-1. Fuente: González-Mendizábal, Dosinda. (2002). Guía de intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones.

1-Carcasa. 2-Tubos. 3-Placa de tubos. 4-Deflectores. 5-Deflector longitudinal. 6-Cabezal posterior. 7-Cabezal fijo. 8-Boquilla de la carcasa. 9-Boquillas para los tubos.

El intercambiador de calor de coraza y tubos, es el tipo más común de intercambiador de calor usado en la industria, un conjunto de tubos llamados haz de tubos contiene el primer fluido,

mientras que el segundo fluido o gas corre a través de los tubos en el lado de la carcasa para que el calor pueda ser transferido entre ellos.

Sabemos que estos equipos son dispositivos donde dos corrientes de fluido en movimiento intercambian calor sin mezclados. Un fluido se desplaza por el tubo interno mientras otro lo hace en el espacio anular entre ambos tubos. El calor se transfiere del fluido caliente al frío a través de la pared que los separa. Están diseñados para la transferencia de calor entre dos fluidos dentro del dispositivo, por lo que normalmente la coraza externa está bien aislada para evitar cualquier pérdida de calor hacia el medio circundante (Burbano Rojas, 2014).

FUNDAMENTACION TEORICA.

En general un sistema es la combinación de elementos o componentes que actúan conjuntamente y cumplen un objetivo determinado.

Los sistemas pueden clasificarse atendiendo sus características como lineales y alinéales, invariantes en el tiempo y variantes en el tiempo, parámetros concentrados y parámetros distribuidos (Niño, 2011).

Un modelo es el conjunto de elementos cuyo comportamiento es similar en ciertos aspectos al sistema real, el objetivo de modelar un sistema es estudiar ciertas características del sistema (López Carrasco, 2014).

El universo está compuesto de energía y materia, la energía no puede ser creada ni destruida pero puede tomar muchas formas y cambiar de un tipo de forma a otra, la materia por si misma tiene energía interna y sus partículas están en movimiento constante (Niño, 2011).

Cuando una partícula energizada entra en contacto con una partícula menos energizada ocurrirá una transferencia térmica de energía de la partícula más caliente a la partícula más fría hasta que ambas partículas lleguen a un nivel de energía llamado equilibrio térmico.

MODELO MATEMATICO DEL INTENCAMBIADOR DE CALOR. BALANCE DE ENERGÍA EN EL MISMO.

Los intercambiadores de calor por lo general funcionan durante largos periodos de tiempo sin variación apreciable de los valores de sus parámetros operativos. Por consiguiente, pueden ser modelados como dispositivos de flujo constante, además el flujo másico de cada fluido permanece prácticamente constante así como sus principales propiedades, como son sus temperaturas y velocidades a la entrada y salida del dispositivo.

El calor específico de un fluido, en general, cambia con la temperatura. Pero dentro de un rango específico de temperaturas puede ser asumido como constante provocando una pérdida de

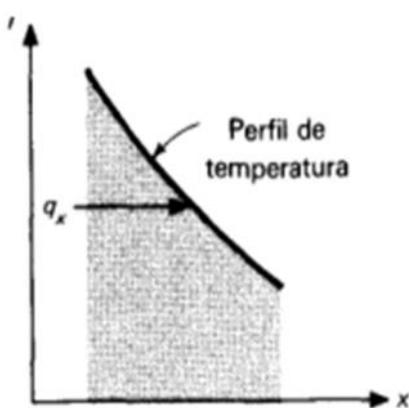
exactitud muy pequeña. Por último, la superficie externa del intercambiador se asume como perfectamente aislada, por lo que no hay intercambio de calor con el medio exterior y solo se produce entre los dos fluido.

Estas simplificaciones asumidas provocan que el modelo no sea rigurosamente semejante al dispositivo real pero simplifican enormemente la simulación del intercambiador de calor obteniéndose resultados con mínima pérdida de exactitud, por lo que estos modelos son ampliamente utilizados.

Bajo estas consideraciones, para no violar el primer principio de la termodinámica, que es un caso particular de la ley universal de conservación y transformación de la energía en aplicación a los fenómenos térmicos, se debe cumplir rigurosamente que el flujo calorífico desde el fluido caliente sea igual al flujo calorífico que recibe el fluido más frío (fig. 2).

La experiencia ha demostrado que cuando existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, hay una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la de baja temperatura. Decimos que la energía es transferida por conducción y que la rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura: $\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$

Cuando se inserta la constante de proporcionalidad,



$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{E.1})$$

Fig.2: Dirección del flujo de calor.

Donde q es la rapidez de transferencia de calor y $\delta T/\delta x$ es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor. A la constante positiva k se le llama la conductividad térmica del material, y el signo menos se inserta para que se satisfaga el segundo principio de la termodinámica, es decir, el calor deberá fluir hacia abajo en la escala de temperatura, como se encuentra indicado en el sistema de coordenadas de la Fig.2. A la Ec.1 se le llama la ley de conducción de calor de Fourier en honor al físico matemático francés Joseph Fourier, quien realizó importantes contribuciones en el tratamiento analítico de la transferencia de calor por conducción.

Es importante observar que la Ec.1 es la igualdad que define la conductividad térmica y que en un sistema de unidades típico en el que el flujo de calor es expresado en W, k tiene las unidades de $W/m^2\text{°C}$.

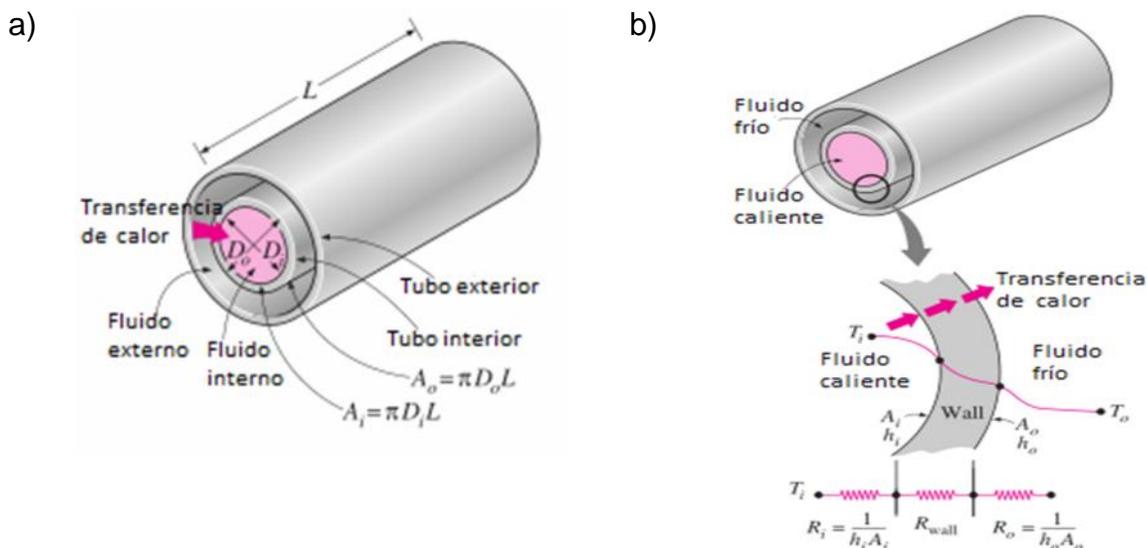


Fig. 3. Áreas de transferencia de calor (a) y red de resistencias térmicas asociadas a la transferencia de calor (b).

Fuente: Cengel, Yunus A. (2005). Transferencia de calor.

Típicamente un intercambiador de calor involucra dos fluidos afluentes separadas por una pared sólida. Primero el calor es transferido desde el fluido caliente hacia la pared interior del tubo por convección, luego a través de toda la pared del tubo por conducción y finalmente desde la pared exterior del tubo hacia el fluido frío nuevamente por convección. Cualquier posible efecto de la radiación es usualmente incluido en los coeficientes de transferencia de calor por convección.

Para un intercambiador de calor de doble tubo, tenemos que las áreas de transferencia de a calor por donde circula el fluido caliente son (pared interior y pared exterior):

$$A_i = \pi D_i L A_o = \pi D_o L$$

Y la resistencia térmica de la pared de ese tubo es:

$$R_{wall} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L}$$

Donde k es la conductividad térmica del material de construcción del tubo y L la longitud del mismo. Entonces, la resistencia térmica total es:

$$R = R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (E.2)$$

Dónde:

A_i – área de la superficie mojada por el fluido interno (m^2).

A_o – área de la superficie mojada por el fluido externo (m^2).

D_i – diámetro interior del tubo interno (m).

D_o – diámetro exterior del tubo interno (m).

R_i – resistencia térmica de la pared interior del tubo interno ($^{\circ}C/W$).

R_o – resistencia térmica de la pared exterior del tubo interno ($^{\circ}C/W$).

R_{wall} – resistencia térmica de la pared del tubo interno ($^{\circ}C/W$).

α_i, α_o – Coeficientes de transferencia de calor por convección de la pared interior y exterior del tubo interno respectivamente ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$).

En el estudio de los intercambiadores de calor, es más práctico utilizar una resistencia térmica total, que su valor represente la suma de todas las resistencias térmicas involucradas en la ruta del flujo de calor desde el fluido caliente hasta el frío, y que denominaremos R, que nos permite expresar la razón de transferencia de calor entre los dos fluidos como:

$$q = \frac{\Delta T}{R} = UA\Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \quad (E.3)$$

Donde U es el coeficiente global de transferencia de calor, cuya unidad de medida es ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$), la misma del coeficiente de convección (h) y puede estar referenciado al área exterior o interior del tubo, en dependencia si se utiliza el área A_i o A_o , empleando la (E.2) y (E.3) obtenemos:

$$q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}}$$

Pero $q = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T$

$$U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T = \frac{\Delta T}{\frac{1}{\alpha_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{\alpha_o A_o}}$$

Resolviendo para el diámetro interior:

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln D_o/D_i}{2\pi k L} + \frac{A_i}{A_o h_o}} \quad (E.4)$$

Se tiene la energía calorífica de salida debido al promedio de la temperatura en la parte exterior del tubo y también la energía del flujo del fluido con su temperatura de salida.

La transferencia de calor real se puede obtener calculando ya sea la energía perdida por el fluido caliente o la energía absorbida por el fluido frío. Considérense los cambiadores de calor de flujo paralelo y a contracorriente que se muestran en la Fig. 10-7.

Para el cambiador de flujo paralelo:

$$q = m_{cal}C_{p-cal} T_{cal1} - T_{cal2} = m_{frio}C_{p-frio} T_{frio1} - T_{frio2}$$

y para el cambiador a contracorriente:

$$q = m_{cal}C_{p-cal} T_{cal1} - T_{cal2} = m_{frio}C_{p-frio} T_{frio2} - T_{frio1}$$

Para determinar la máxima transferencia de calor posible para el cambiador, primero aceptamos que este valor máximo se podría obtener si uno de los fluidos sufriera un cambio de temperatura igual a la diferencia máxima de temperatura presente en el cambiador, la cual es la diferencia entre las temperaturas de entrada de los fluidos caliente y frío. El fluido que podría sufrir esta diferencia de temperatura máxima es aquel que tenga el mínimo valor de mC ya que el balance de energía requiere que la energía que recibe por un fluido sea igual a la que cede el otro; si permitimos que el fluido con el mayor valor de mC sufra la diferencia máxima de temperatura, esto requiere que el otro fluido sufra una diferencia de temperatura mayor al máximo, lo cual es imposible. De esta manera, la máxima transferencia de calor posible se expresa como:

$$q_{m\acute{a}x} = mC_{\min}(T_{cal-ent} - T_{cal-sal})$$

La relación que se desea entre la temperatura de entrada y la de salida del intercambiador da como resultado que debe existir un balance de energía en estado dinámico en cada pequeña sección diferencial del intercambiador y para cada fluido:

$$e_{i1} + e_{i2} - e_{o1} + e_{o1} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot C_p \cdot \frac{dt_s}{dt} \text{ (E.5)}$$

Dónde:

$$e_{i1} = U_{do} \cdot A_{TCO} \cdot t_v \quad \text{Energía calorífica del fluido calentador}$$

a la entrada.

$e_{e2} = w \cdot C_p \cdot t_e$ Energía calorífica del fluido a calentar a la entrada

$e_{o1} = U_{do} \cdot A_{TCO} \cdot \frac{t_e+t_s}{2}$ Energía calorífica del fluido calentador a la salida

$e_{o2} = w \cdot C_p \cdot t_s$ Energía calorífica del fluido a calentar a la salida

Dónde:

U_{do} : Coeficiente global de transferencia de calor referido al diámetro exterior. (BTU/h °F pie²) (W/m²°C)

El coeficiente global de transferencia de calor, U, es una función de diversos factores; uno de ellos es la temperatura. Puesto que se supone que la masa y la densidad del líquido dentro del intercambiador de calor también son constantes, entonces la temperatura del líquido es constante y, en consecuencia, el área de transferencia de calor, A_{TCO} , también es constante.

C_p : Capacidad calorífica a presión constante del líquido a la entrada y a la salida, respectivamente, en (BTU/lb °F)

A_{TCO} : Área de transferencia de calor referida al diámetro exterior. (pie²)

w : flujo másico de agua (lb/h)

t_e : temperatura a la entrada del agua a calentar (°F)

t_s : temperatura a la salida del agua a calentar (°F)

t_v : temperatura del vapor (°F)

m : peso de la cantidad de agua dentro de los tubos (lb)

$\frac{t_e+t_s}{2}$: temperatura media del agua dentro de los tubos (°F)

Sustituyendo y buscando factor común en el coeficiente global de transferencia de calor:

$$U_{do} \cdot A_{TCO} \cdot t_v - \frac{(t_e+t_s)}{2} + w \cdot C_p \cdot t_e - w \cdot C_p \cdot t_s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot C_p \cdot \frac{dt_s}{dt} \text{ (E.6)}$$

Ésta es una ecuación diferencial lineal ordinaria de primer orden que expresa la relación entre la temperatura de entrada y la de salida: Es importante señalar que en esta ecuación sólo existe una incógnita, t_s ; la temperatura de entrada, $t_e(t)$, es una variable de entrada y, por tanto, no se considera como incógnita, ya que se puede especificar la forma en que cambia, por ejemplo, un cambio en escalón o en rampa.

LINEALIZACIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL.

Aunque casi todo sistema real tiene características no lineales, es decir, la relación entrada-salida no puede ser representada por una ecuación diferencial lineal, ni cumple con el principio de superposición, muchos sistemas pueden describirse razonablemente por modelos lineales al menos dentro de ciertos intervalos de operación.

Desde un punto de vista práctico, para obtener estos modelos lineales es común comenzar con un modelo no lineal y, a partir de este, construir una aproximación lineal en la vecindad de un punto de operación elegido. Este enfoque constituye una herramienta clave para el modelado lineal en diversos campos, por ejemplo, en la Electrónica analógica y en el Control Automático.

Considere un sistema no lineal cuya entrada es $x(t)$ y cuya salida es $y(t)$. La relación entre $y(t)$ y $x(t)$ se obtiene mediante: $y = f(x)$

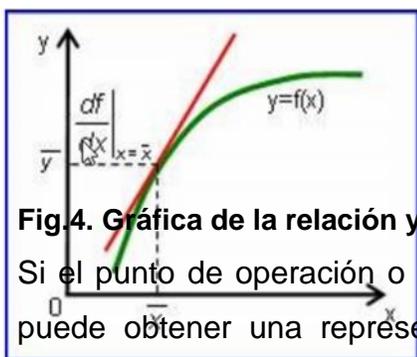


Fig. 4. Gráfica de la relación $y = f(x)$

Si el punto de operación o trabajo elegido corresponde a \bar{y} y como esta curva es continua, se puede obtener una representación de $y = f(x)$ mediante su expansión en serie de Taylor alrededor de este punto de operación, esto es

$$f(x) = f(x_0) + \frac{dy}{dx}(x - x_0) + \frac{d^2f}{dx^2} \frac{(x - x_0)^2}{2!} + \dots$$

$$wC_p t_s = w_0 C_p t_{s0} + C_p t_{s0} \cdot (w - w_0) + C_p w_0 (t_s - t_{s0}) = w_0 C_p t_{s0} + C_p w_0 (t_s - t_{s0})$$

$$= w_0 C_p t_{s0} + C_p w_0 (t_s - t_{s0}) \quad (E.7)$$

$$U_{doATCO} \left(t_v - \frac{t_e}{2} - \frac{t_s}{2} \right) + wC_p t_e - wC_p t_{s0} + w_0 C_p (t_s - t_{s0}) \Big] = \frac{1}{2} \cdot m \cdot C_p \cdot \frac{dt_s}{dt} \quad (E.8)$$

Evaluando en condiciones iniciales estables:

$$U_{do}A_{TCO} \left(t_v - \frac{t_e}{2} - \frac{t_s}{2} \right) + w_o C_p t_e - w_o C_p t_{s0} = 0 \quad (E.9)$$

Restando E(4) de E(5) tenemos:

$$\begin{aligned} U_{do}A_{TCO} t_v - t_{v0} - \frac{1}{2}U_{do}A_{TCO} t_s - t_{s0} + w - w_o C_p t_e - w - w_o C_p t_{s0} - w_o C_p t_s - t_{s0} = \\ = \frac{1}{2}mC_p \frac{dt_s}{dt} \end{aligned}$$

Utilizando variables de desviación:

$$U_{do}A_{TCO}t_v - \frac{1}{2}U_{do}A_{TCO}t_s + C_p t_e w - C_p t_s w_o - w_o C_p t_s = \frac{1}{2}mC_p \frac{dt_s}{dt}$$

Aplicando transformada de Laplace:

$$U_{do}A_{TCO}T_v(s) - \frac{1}{2}U_{do}A_{TCO}t_s + w_o C_p + \frac{1}{2}mC_p s T_s(s) - C_p(t_e - t_{s0})w(s) = 0$$

La ecuación en términos de la frecuencia es:

$$\Delta E_{i1} - \Delta E_{i0} + \Delta E_{i2} - \Delta E_3 - \Delta E_4 = \frac{1}{2}mC_p s \Delta T_s(s) \quad (E.10)$$

Dónde:

$$\Delta E_{i1} = U_{do}A_{TCO}\Delta T_v(s)$$

$$\Delta E_{i2} = \Delta w(s)C_p t_e$$

$$\Delta E_{01} = U_{do}A_{TCO} \frac{\Delta T_s(s)}{2}$$

$$\Delta E_3 = \Delta w(s)C_p t_{s0}$$

$$\Delta E_4 = C_p w_o \Delta T_s(s)$$

Se agrupan los términos de factor común:

$$\Delta E_{i1} + \Delta w = \Delta T_s(s) \left(\frac{mC_p s}{2} + \frac{U_{do}A_{TCO}}{2} + C_p w_o \right) \quad (E.10)$$

Dónde:

$$\Delta E_{i1} = U_{do} A_{TCO} \Delta T_v(s)$$

$$\Delta w = \Delta w(s) C_p t_e - C_p t_{s0}$$

Pasando al término de la izquierda la variable de temperatura de salida:

$$\Delta T_s \ s \ Z_d = E_{i1} + \Delta w(s) C_p t_e - C_p t_{s0}$$

Dónde:

$$Z_d = \frac{m C_p s}{2} + \frac{U_{do} A_{TCO}}{2} + C_p w_0$$

Se despeja la temperatura de salida:

$$\Delta T_s \ s = \frac{U_{do} A_{TCO}}{Z_d} \Delta T_v \ s + \frac{C_p t_e - t_{s0}}{Z_d} \Delta w(s) \quad (E.11)$$

De manera que todo este desarrollo matemático es para lograr componer la función de transferencia del intercambiador de calor. El nombre de “función de transferencia” proviene del hecho de que con la solución de la ecuación se transfiere la entrada o función de forzamiento, $T_e(t)$, a la salida o variable de respuesta, $T_s(t)$. La función de transferencia obtenida queda como sigue:

$$T_s = \frac{0.381883131}{1.712995 \ s + 1} T_v \ s + \frac{-7.573947 e^{-4}}{1.712995 \ s + 1} w(s) \quad (E.10)$$

La ecuación anterior relaciona la variable de salida T_s (variable controlada) a la variable regulada T_v (entrada o carga), y los números son las constantes características de tiempo del proceso. Esta función de transferencia es de segundo orden.

Para calcular esta ecuación y graficarla emplearemos la aplicación computacional MATLAB.
PROGRAMA INFORMATICO MATLAB.

MATLAB es un programa informático interactivo para computación numérica y visualización de datos. Es ampliamente usado por Ingenieros en el análisis y diseño, posee además una extraordinaria versatilidad y capacidad para resolver problemas en matemática aplicada, física, química, ingeniería, finanzas y muchas otras aplicaciones. Está basado en un sofisticado software de matrices para el análisis de sistemas de ecuaciones. Permite resolver complicados problemas numéricos sin necesidad de escribir un programa.

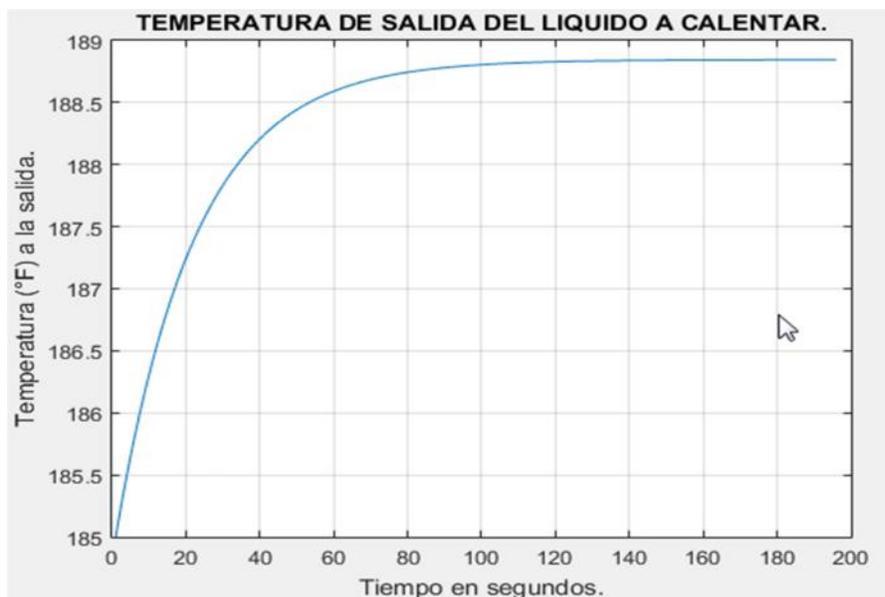
MATLAB es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos.

Tabla 1. Valores de las variables más importantes para la simulación.

| | |
|---|---|
| Largo del intercambiador | 9 pies |
| Diámetro de la coraza | 17,25 plg |
| Flujo | 224 gal/min |
| Temperatura de entrada | 80 °F |
| Temperatura de salida | 185 °F |
| Presión de vapor | 150 lb/plg ² abs. |
| Numero de tubos | 112 |
| Diámetro exterior de tubo | 0,25 plg con un claro entre tubos de 0,63 plg |
| Conductividad térmica de los tubos | 26 BTU/h pie °F |
| Factor de obstrucción interno | 0,0012 h pie ² °F/BTU |
| Factor de obstrucción externo | 0,001 h pie ² °F/BTU |
| Coefficiente global de transferencia de calor | 650 BTU/h pie ² °F |

Fuente: Tabla elaborada en Excel para este trabajo.

Después de preparar el archivo denominado simulación.m, dónde se recogen todas las variables mostradas en la tabla 1, las fórmulas y funciones propias que solo acepta el software Matlab, se ejecuta en el mismo y se obtiene la siguiente gráfica.



Fuente: Grafica obtenida del programa MATLAB.

El fluido a calentar ingresa en el intercambiador de calor con una temperatura T_e de 80°F y al cabo de 120 segundos ya ha adquirido una temperatura que alcanza los 188.8 °F, temperatura con la que sale del mismo, de manera que se puede afirmar que el diseño, aun sin construir, cumplirá con los parámetros esperados.

CONCLUSIONES

1. Empleando los parámetros calculados en el trabajo “Simulación de funcionamiento de un intercambiador de calor de coraza y tubos mediante el empleo de MATLAB” se logró obtener un modelo matemático teórico y experimental aproximado de un intercambiador de calor.
2. El uso de MATLAB/SIMULINK, facilita el trabajo de diseño y prueba de sistemas dinámicos porque permite la creación de funciones de transferencias y de entradas al sistema con respuesta al escalón, comprobando que el dispositivo cumplirá con los indicadores necesarios cuando sea realidad.

RECOMENDACIONES

1. Emplear las bondades que brinda la herramienta GUIDE de MATLAB para crear una aplicación interactiva que brinde más facilidades de cálculo de intercambiadores de calor, pues actualmente se utiliza un archivo de texto con extensión .m para simular dentro del entorno MATLAB y es necesario su edición si cambian algunos parámetros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Albitres Moncada, Luis. (2005).Automatización y control de procesos, segunda edición, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.
2. Niño, Elvira. (2011). Aplicaciones reales de la transformada de Laplace.
3. en <http://es.slideshare.net/gabriellacayo/aplicacionesreales-laplace-8485102>.
4. López Carrasco, Bastián. (2012). Intercambiador de calor de doble tubo, en http://caaeii.cl/wpcontent/uploads/2012/07/EIQ_303_2012_17_Intercambiadores_de_Calor_de_Doble_Tubo.pdf.
5. Ogata, Katsuhiko. (1998). Ingeniería de control moderna, Tercera edición, Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
6. Turnero, Pablo, Aplicaciones de la transformada de Laplace, en http://Monografias.com/Control_de_procesos/Laplace.

7. Burbano Rojas, Sonia Paola. (2014). Diseño de un módulo de intercambiador de calor de coraza y tubos, Universidad Santo Tomas, Bogotá. <http://ul.to/r7a6dsa8>
8. Wikipedia, SIMULINK. (2007). <http://es.wikipedia.org/wiki/SIMULINK>.
9. Wikipedia, MATLAB. (2007). <http://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB>.
10. Holman, J. P. (1998). Transferencia de Calor, 8va Edición.
11. Cengel, Yunus A. (2005). Transferencia de calor, segunda edición, México: Mcgraw Hill.
12. González-Mendizábal, Dosinda. (2002). Guía de intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones. Universidad Simón Bolívar