



UNAM

FES Zaragoza

Ingeniería Química

Laboratorio y Taller de Proyectos

4663

Alumna encargada: Tapia Hernández Jesica

“ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR
(VIDRIO).”

2020-2

Objetivos

- Obtener experimentalmente el coeficiente de transferencia de calor del equipo, en posición horizontal.
- Determinar la variación del coeficiente global de transferencia de calor con respecto al número de Reynolds.
- Comparar los datos experimentales con los que predice la teoría.

Marco teórico

Se denomina transferencia de calor al transporte de energía dentro de un sistema o de un sistema a otro, debido a un gradiente de temperatura. Aun cuando el calor transferido no puede ser medido ni observado directamente, sus efectos como la variación del contenido de energía interna de los sistemas involucrados, permiten su cuantificación.

La transferencia de calor puede presentarse mediante tres mecanismos distintos: *conducción, convección y radiación*. En la mayoría de los procesos reales, la transferencia de calor depende de que ocurran dos o incluso los tres mecanismos simultáneamente; en estos casos, la energía térmica total transferida se obtiene sumando las cantidades transmitidas mediante cada mecanismo.

- **Conducción**

La conducción térmica se presenta cuando la transferencia de calor es realizada mediante colisiones de los átomos que forman la materia. La conducción puede verse como la transferencia de energía desde las partículas más energéticas hacia las menos energéticas de una sustancia, causada por las interacciones entre las mismas.

La velocidad de transferencia de calor por conducción está determinada por la ley de Fourier (macroscópicamente), la cual establece que la variación temporal de la transferencia de calor por conducción en una dirección dada es directamente proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor, A y al gradiente de la temperatura en esa dirección, dT . Para un flujo unidimensional de calor, en la dirección x se tiene (Figura 1):

$$\frac{dQ_x}{dt} = -kAdTdx \quad (1)$$

Dónde:

$\frac{dQ_x}{dt}$ = Velocidad de flujo de calor que atraviesa el área A en la dirección x

k = Constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica.

T = Temperatura.

t = Tiempo.

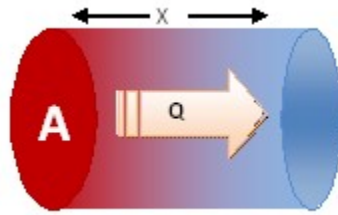


Figura 1. Volumen de balance de calor

- Convección

La convección es la transferencia de energía causada por el movimiento de un fluido. Cuando un cuerpo está en contacto con un medio líquido o gaseoso que tiene una temperatura más baja o más alta, se transfiere calor entre la superficie del cuerpo y el fluido. El intercambio de calor produce una variación en la densidad del fluido. Este cambio es grande en el caso de un gas y está expresado por las leyes de los gases, de modo que las fuerzas de flotación del gas positivas (o negativas) adyacentes a la superficie caliente (o fría) hacen que se mueva. Entonces, una nueva cantidad de fluido entra en contacto con la superficie y se repite el proceso. Este movimiento de la masa del fluido adyacente a la superficie se denomina convección. En el caso de los líquidos la variación de densidad es menor, pero la convección se induce también en estos materiales. Un ejemplo claro de este fenómeno es el termosifón, utilizado para mover el fluido de trabajo en los tubos de los colectores solares (agua, agua con etilenglicol, metanol, acetona, mezclas de estas sustancias).

Hay dos tipos de convección: la convección natural y la convección forzada.

En la convección natural, la fuerza motriz procede de la variación de densidad en porciones del fluido, como consecuencia del contacto con una superficie a temperatura diferente, lo que da lugar a fuerzas tensoriales. El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior.

La convección natural ayuda a explicar muchos de los sistemas naturales de la Tierra, como las corrientes oceánicas y las capas atmosféricas. Por ejemplo, cuando la superficie terrestre

absorbe la radiación solar aumenta su temperatura, y el aire que está en contacto con el suelo es casi siempre más caliente que el aire en las capas superiores. El calor incrementa los espacios entre las moléculas, haciendo que el aire más ligero se eleve por encima de la superficie. Como el aire se aleja de la superficie caliente de tierra, las moléculas se enfrían y se comprimen. Sobre este aire frío actúa la gravedad que lo lleva hacia abajo, donde se calienta de nuevo y comienza un nuevo ciclo.

La convección forzada, se presenta cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido sobre una superficie que se encuentra a una temperatura mayor o menor que la del fluido. Esa fuerza motriz exterior puede ser el viento, un ventilador, una bomba, etc. Debido a que la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para un determinado gradiente de temperatura.

La transferencia de calor por convección se determina mediante la Ley de enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = h_{conv} A (T_0 - T_f) \quad (2)$$

Dónde:

h_{conv} = Coeficiente de transferencia de energía por convección (W/m² K), depende de la rugosidad, forma y posición de la superficie, así como de las características del flujo.

T_0 = Temperatura de la superficie (°C)

T_f = Temperatura del fluido (°C)

- Radiación

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a cualquier temperatura, mayor de 0 K. Todos los cuerpos emiten energía en forma continua desde sus superficies, esta energía se denomina energía radiante y es transportada por ondas electromagnéticas. A diferencia de la conducción y la convección, la radiación no necesita un medio de transmisión y puede ocurrir en el vacío. La transferencia de calor por radiación es la más rápida, a la velocidad de la luz y no sufre atenuación en el vacío.

La radiación térmica es de la misma naturaleza que la luz visible, los rayos X y las ondas de radio y solo se diferencia de estas en la longitud de onda y la fuente de generación.

La radiación térmica se calcula basándose en la ley de Stefan-Boltzmann, que establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva superficial (E) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura.

$$E = \sigma AT^4 \quad (3)$$

Dónde:

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

A = Área de la superficie emisora

T = Temperatura de la superficie

La radiación emitida por una superficie real es una porción de la que emitiría el cuerpo negro. Esa porción viene dada por la emisibilidad, que cuantifica la radiación emitida por una superficie real respecto a la que emitiría el cuerpo negro. La radiación emitida por una superficie real se expresa como:

$$E = \epsilon \sigma AT^4 \quad (4)$$

El rango de valores de la emisibilidad está comprendido en el intervalo: $0 < \epsilon < 1$. Para el cuerpo negro $\epsilon = 1$.

Balances de energía

El tratamiento cuantitativo de los problemas de transmisión de calor se fundamenta en los balances de energía. La mayoría de los equipos de transmisión de calor operan en un régimen estacionario, y este tipo de operación será el considerado en las siguientes ecuaciones:

De la ecuación de balance de energía total para fluidos se plantea la ecuación:

$$E_1 + \frac{V_1^2}{2gc} + z_1 \frac{g}{gc} + \frac{P_1}{\rho} + Q = E_2 + \frac{V_2^2}{2gc} + z_2 \frac{g}{gc} + \frac{P_2}{\rho} + \tau \quad (5)$$

Aplicando la ecuación (5) a un intercambiador de calor y considerando:

$$\frac{V_1^2}{2gc} = \frac{V_2^2}{2gc}; z_1 \frac{g}{gc} = z_2 \frac{g}{gc}; \frac{P_1}{\rho} = \frac{P_2}{\rho}; \tau = 0$$

$$\therefore Q = E_2 - E_1 = \Delta E \quad (6)$$

Por definición de Entalpía

$$H=E+P \cdot V \quad (7)$$

Sustituyendo en la ecuación (7) en (6):

$$Q=(H_2-P_2V_2)-(H_1-P_1V_1) \quad (8)$$

Si

$$P_2V_2 \approx P_1V_1 \quad (9)$$

Entonces:

$$Q=(H_2-H_1) \quad (10)$$

Para la cantidad de masa (w) por unidad de tiempo, que emplea el fluido:

$$Q=w \cdot (H_2-H_1) \quad (11)$$

Dónde:

w = Gasto, $(\frac{\text{kg}}{\text{hr}})$

H_2 = Entalpía en el punto 2, $(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$

H_1 = Entalpía en el punto 1, $(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$

La ecuación (11) puede escribirse para cada una de las corrientes que circulan a través de un intercambiador de calor, suponiendo que el equipo está aislado convenientemente

Para el fluido caliente:

$$Q_c=w_c(H_2-H_1)_c \quad (12)$$

Para el fluido frío:

$$Q_f=w_f(H_1-H_2)_f \quad (13)$$

Dónde:

Q_c = Calor transferido por el fluido caliente, J

Q_f = Calor transferido por el fluido frío, J

w_c = Gasto masa del fluido caliente $(\frac{\text{kg}}{\text{hr}})$

w_f = Gasto masa del fluido frío $(\frac{\text{kg}}{\text{hr}})$

H_c = Entalpía del fluido caliente $(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$

H_f = Entalpía del fluido frío $(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$

Ahora bien, el calor perdido por el fluido caliente lo gana el fluido frío, por lo tanto:

$$Q_c = Q_f \quad (14)$$

o

$$w_c(H_2 - H_1)_c = w_f(H_1 - H_2)_f \quad (15)$$

Suponiendo que los calores específicos del fluido caliente y frío son constantes, la ecuación (15) se presenta en la forma siguiente:

$$w_c \cdot C_{pc} \cdot (T_2 - T_1)_c = w_f \cdot C_{pf} \cdot (T_1 - T_2)_f \quad (16)$$

Dónde:

C_{pc} y C_{pf} ; son los calores específicos del fluido caliente y frío, respectivamente. $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$

Si uno de los fluidos se condensa, la ecuación (16) se escribe como:

$$Q = w_v \cdot \lambda = w_f \cdot C_{pf} \cdot (T_1 - T_2)_f \quad (17)$$

Dónde:

w_f = Gasto de vapor que condensa ($\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$)

λ = Calor latente de vaporización a la temperatura de condensación $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

En la ecuación (17) se supone que el vapor llega al condensador como vapor saturado y que el condensado sale a la temperatura de saturación.

Si el condensado sale a una (T_b) menor que la temperatura (T_a) de saturación, la ecuación (17) se expresa en la forma siguiente:

$$w_v(\lambda + C_{pc}(T_a - T_b)) = w_f \cdot C_{pf} \cdot (T_1 - T_2)_f \quad (18)$$

Dónde:

C_{pc} = Calor específico del condensado $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

λ = Calor latente de vaporización a la temperatura de condensación $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Coeficiente total de transferencia de calor

Los cálculos para el diseño de un intercambiador de calor se basan en la ecuación de Fourier, esta es:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (19)$$

Dónde:

Q = Calor transferido, J ($1J = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 1 \text{ kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$; calor en termoquímica, ($1 \text{ cal} = 4.184 J$)

U = Coeficiente Total de Transferencia de Calor, $\text{W/m}^2\text{K}$; (energía interna, J/kg)

A = Área Total de Transferencia de Calor, m^2 ,

ΔT = Diferencia de Temperaturas, K , o $^{\circ}C$.

Si la ecuación (19) se aplica a un elemento diferencial del intercambiador, la transferencia de este se expresa como:

$$dQ = U \cdot \Delta T \cdot dA \quad (20)$$

Dado que la temperatura de al menos uno de los fluidos varía en la mayoría de los intercambiadores, la fuerza impulsora entre los fluidos caliente y frío también variará. Estos cambios tienen como consecuencia, alteraciones en los valores de Q y U , debido a las variaciones de las propiedades físicas de los fluidos y del cambio en el régimen de flujo, en donde la integración de la ecuación (20) se torna difícil, separando variables:

$$\int dQ = \int U \Delta T dA \quad (21)$$

Para integrar la ecuación (21) con mayor facilidad, hay que tomar en cuenta las siguientes suposiciones con el fin de simplificarla:

El coeficiente total de transferencia de calor U es constante.

Los coeficientes específicos de los fluidos caliente y frío C_{pc} y C_{pf} son constantes.

El intercambio de calor con el medio ambiente es despreciable.

El flujo de calor es a régimen permanente y tiene lugar en corriente en paralelo o a contracorriente.

Se ha dicho que el coeficiente total de transferencia de calor varía al cambiar las temperaturas de los fluidos, pero el cambio es gradual; de tal forma que, cuando los intervalos de temperatura son moderados, la suposición de que U , permanece constante no conduce a un error muy significativo.

Tomando en cuenta las suposiciones anteriores e integrando la ecuación (19), el resultado es el siguiente:

$$Q = U \cdot A \cdot [\Delta T_2 - \Delta T_1 \ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}] = U \cdot A \cdot (MLDT) \quad (22)$$

Dónde:

$MLDT$: Es la media logarítmica de la diferencia de temperaturas, K o $^{\circ}C$

Ahora bien, para un flujo en paralelo:

$$\Delta T_2 = T_1 - t_1 \quad (23)$$

$$\Delta T_1 = T_2 - t_2 \quad (24)$$

Para un flujo a contracorriente:

$$\Delta T_2 = T_1 - t_2 \quad (25)$$

$$\Delta T_1 = T_2 - t_1 \quad (26)$$

Dónde:

T_1 = Temperatura de entrada del fluido caliente, $K^\circ C$

T_2 = Temperatura de salida del fluido caliente, $K^\circ C$.

t_1 = Temperatura de entrada del fluido frío, $K^\circ C$.

t_2 = Temperatura de salida del fluido frío. $K^\circ C$.

Coefficientes de transferencia de calor individuales.

La resistencia global al flujo de calor desde el fluido caliente al frío es el resultado de la disposición en serie de tres resistencias independientes separadas; dos de las resistencias son las que ofrecen los fluidos individualmente, la tercera corresponde a la pared que separa los dos fluidos. El coeficiente global se puede evaluar a partir de los coeficientes individuales y a la resistencia térmica de la pared del tubo.

Puesto que Q es igual a $\Delta T \Sigma R$, se tiene:

$$\Sigma R = \frac{1}{h_i} + \frac{Lm}{km} + \frac{1}{h_0} \quad (26)$$

Dónde:

ΣR = Resistencia total, KW

h_i = Coeficiente de película interior, $\frac{J}{kg}$

h_0 = Coeficiente de película exterior, $\frac{J}{kg}$

Lm = Longitud media, m

km = Conductividad térmica media. $\frac{W}{m \cdot K}$

Es costumbre sustituir $1/U$ por ΣR . Ya que el tubo real tiene diferentes áreas por metro o pie lineal, tanto en su interior como en su exterior, h_i y h_0 deben referirse a la misma área de flujo de calor o en otra forma no coincidirán por unidad de longitud. Si se usa el área exterior del tubo interno, entonces h_i debe multiplicarse por A_i/A para dar el valor que

tendría h_i se calculará originalmente con base en el área mayor A en lugar de A_i . Para una tubería de pared gruesa la ecuación (26) se transforma en:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i \cdot (A_i/A)} + \frac{2.3D}{2k} \log \frac{D_o}{D_i} + \frac{1}{h_o} = \frac{1}{h_o \cdot (D_i/D_o)} + \frac{2.3D_o}{2k} \log \frac{D_o}{D_i} + \frac{1}{h_o} \quad (27)$$

Usando la simplificación de que la resistencia térmica de la pared de un tubo delgado es despreciable para paredes metálicas, la ecuación (27) se puede escribir como:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i \cdot (A_i/A)} + \frac{1}{h_o} = \frac{1}{h_i \cdot (D_i/D_o)} + \frac{1}{h_o} \quad (28)$$

Determinación de los coeficientes de película

1.- Lado de los tubos,

Calentamiento de un líquido por el interior de un tubo:

Flujo turbulento:

$$\frac{h_i D}{k} = 0.023 \left(\frac{D G}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{0.33} \quad (29)$$

2. Para fluidos muy viscosos con $Re < 8000$:

$$\frac{h_i D}{k} = 0.027 \left(\frac{D G}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (30)$$

Flujo laminar:

$$\frac{h_i D}{k} = 2(w C_p k L)^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (31)$$

Si C = Masa velocidad = $N \cdot t \cdot atn$ (32)

Dónde:

μ_s = Viscosidad a la temperatura de la superficie metálica, $Pa \cdot s$

w = Masa del fluido, kg

Nt = Número de tubos, #

at = Área de paso por tubo, m^2

n = Número de pasos, adimensional xx

L = Longitud del tubo, m

2.- Lado de la coraza.

Enfría

miento de vapor por el interior de la coraza:

Condensación de un vapor por el exterior de los tubos:

$$h=0.0084\left(\frac{w}{\mu D_0}\right)^{0.4}\left(\frac{k^3 \rho^2 g}{\mu^2}\right)^{\frac{1}{3}}(33)$$

Dónde:

w = Gasto masa del condensado $\frac{kg}{hr}$

μ = Viscosidad del condensado $Pa \cdot s$ ó $\frac{kg}{m \cdot s}$ ó $\frac{N \cdot s}{m^2}$

D_0 = Diámetro externo de los tubos m

k = Conductividad térmica del condensado $\frac{W}{m \cdot K}$

ρ = Densidad del condensado $\frac{kg}{m^3}$

g = Gravedad 9.80665 ms^{-2} , $gc=980.665 \text{ gm} \cdot \frac{cm}{gf \cdot s^2}$

La ecuación (33) es válida para valores de:

$$w\mu D_0 > 1020$$

Para valores menores se recomienda la ecuación:

$$h=0.943\left(\frac{\rho^2 \cdot k^3 \cdot g \cdot \lambda}{L \cdot \mu \cdot \Delta T_0}\right)^{.25}(34)$$

Las propiedades físicas de las ecuaciones (33) y (34) se evalúan a la temperatura promedio de la película t_f , la cual se considera como:

$$t_f = t_v - 0.75(t_v - t_w) = t_v - 0.75\Delta T_0 (35)$$

Dónde:

t_w = Temperatura de la pared, K o $^{\circ}C$

t_v = Temperatura del vapor saturado, K o $^{\circ}C$

3.- Coeficiente de transferencia de calor entre la superficie externa de un banco de tubos horizontales y vapor.

$$h=0.725\left(\frac{k_3 \cdot \rho_2 \cdot \lambda \cdot g}{N_{t23} \cdot \Delta T_0 \cdot \mu \cdot D_0}\right)^{1/4} \quad (36)$$

Las propiedades físicas en la ecuación (36) se evalúan a la temperatura promedio de la película t_f .

En la ecuación (35), no se puede evaluar la temperatura de pared, por lo tanto, se tiene que resolver mediante iteración, esto es se supone una temperatura muy cercana a la temperatura del vapor y para comprobar se usa la ecuación siguiente: h_0

$$(t_v - t_w) = h_i(t_v - t_m) \quad (37)$$

$$\text{Dónde: } t_m = \frac{t_0 + t_s}{2} \quad (38)$$

Dónde:

t_0 = Temperatura de entrada del fluido frío, K o $^{\circ}C$

t_s = Temperatura de salida del fluido frío, K o $^{\circ}C$

Intercambiador de calor

El intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos fluidos, encontrándose éstos en contacto o separados por una barrera sólida.

Los intercambiadores de calor se emplean para los siguientes usos:

- Elevar la temperatura de un fluido gracias a otro más caliente.
- Refrescar un fluido empleando otro con menor temperatura.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido por la acción de un segundo con mayor temperatura.
- Condensar gases utilizando fluidos fríos.
- Llevar a ebullición un determinado fluido mientras se condensa otro gaseoso más caliente.

Su papel es clave para aumentar la eficiencia en los procesos de todo el sistema ya que, dependiendo de sus condiciones y una correcta ingeniería desde su diseño, fabricación e instalación, permite optimizar la calidad de los procesos que permiten el ciclo de refrigeración.

Los Intercambiadores de Calor pueden ser clasificados en:

1. Según el tipo de servicio
2. De acuerdo con el proceso de transferencia
3. De acuerdo con los mecanismos de transferencia de calor
4. De acuerdo con el número de fluidos involucrados
5. De acuerdo con la disposición de los fluidos
6. De acuerdo con la compactación de la superficie
7. De acuerdo con el tipo de construcción

1. Según el tipo de servicio.

❖ **Enfriador:** Es una unidad en la cual una corriente de proceso intercambia calor con agua o aire sin que ocurra cambio de fase.

❖ **Calentador:** Aumenta la entalpía de una corriente, sin que normalmente ocurra un cambio de fase.

❖ **Refrigerador:** Es una unidad que utiliza una sustancia refrigerante para enfriar un fluido, hasta una temperatura menor que la obtenida si se utilizara aire o agua como medio de enfriamiento.

❖ **Condensador:** Es una unidad en la cual los vapores de proceso se convierten total o parcialmente en líquidos. Generalmente se utiliza agua o aire como medio de enfriamiento

❖ **Evaporador:** Los evaporadores son intercambiadores diseñados específicamente para aumentar la concentración de las soluciones acuosas mediante la evaporación de una parte del agua.

❖ **Vaporizador:** Es un intercambiador que convierte líquido a vapor.

❖ **Rehervidor:** Es un vaporizador que suministra el calor latente de vaporización al fondo (generalmente) de una torre fraccionadora. Hay dos tipos generales de rehervidores, aquellos que envían dos fases a la torre para separar el vapor del líquido y los que retornan vapor solamente

2. De acuerdo con el proceso de transferencia

❖ **De contacto directo:** Este tipo de intercambiador, el calor es transferido por contacto directo entre dos corrientes distintas fases (generalmente un gas y un líquido de muy baja presión de vapor) fácilmente separables después del proceso de transferencia de energía; como ejemplo se tienen las torres de enfriamiento de agua con flujo de aire.

El flujo de aire puede ser forzado o natural.

❖ **De contacto indirecto:** En los intercambiadores de tipo contacto indirecto, las corrientes permanecen separadas y la transferencia de calor se realiza a través de una pared divisora, o desde el interior hacia el exterior de la pared de una forma no continua.

3. De acuerdo con los mecanismos de transferencia de calor Los mecanismos básicos de transferencia de calor entre un fluido y una superficie son:

❖ Convección en una sola fase, forzada o libre.

❖ Convección con cambio de fase, forzada o libre: condensación o ebullición.

❖ Una combinación de convección y radiación.

4. De acuerdo con número de fluidos involucrados La mayoría de los procesos de disipación o recuperación de energía térmica envuelve la transferencia de calor entre dos fluidos. Por ejemplo, en procesos criogénicos y en algunos procesos químicos: separación aire-helio, síntesis de amonio, etc.

5. De acuerdo con la Disposición de los Fluidos La selección de una disposición de flujo en particular depende de la eficiencia de intercambio requerida, los esfuerzos térmicos permitidos, los niveles de temperatura de los fluidos, entre otros factores.

6. De acuerdo con la Compactación de la Superficie De acuerdo con la relación superficie de transferencia de calor a volumen ocupado, los equipos también pueden ser clasificados como compactos o no compactos. Un intercambiador compacto es aquel cuya relación superficie a volumen es alta, mayor de $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ($213 \text{ ft}^2/\text{ft}^3$) valor que es arbitrario.

Las ventajas más resaltantes de un intercambiador compacto son los ahorros de material, espacio ocupado (volumen) y costo, pero tienen como desventajas que los fluidos deben ser limpios, poco corrosivos y uno de ellos, generalmente, en estado gaseoso.

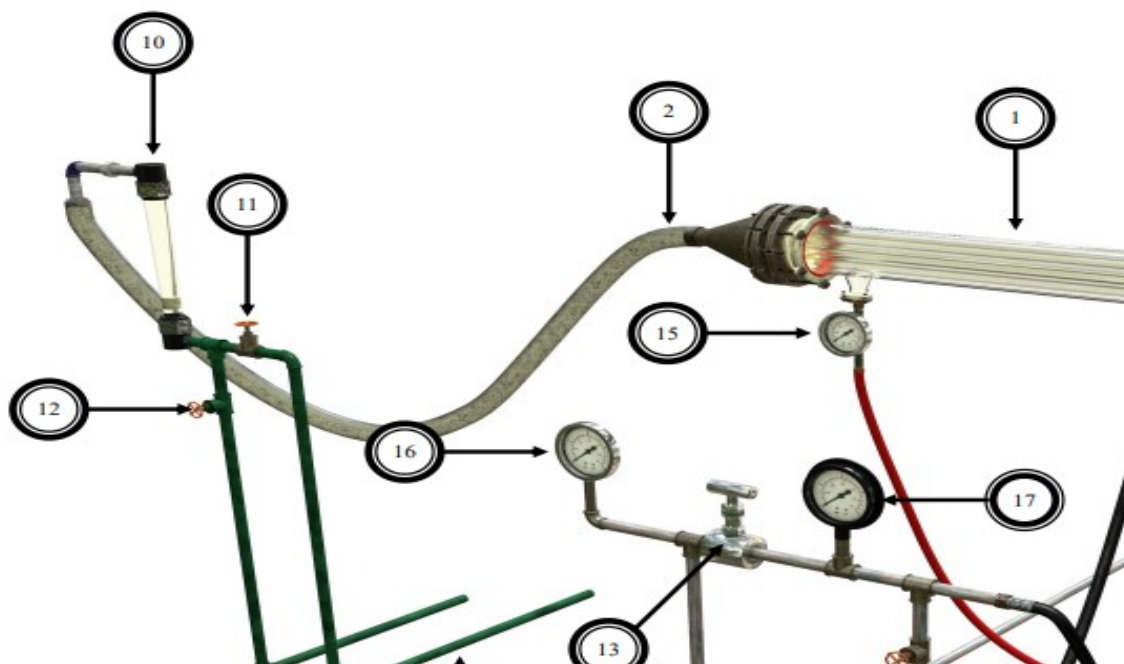
7. De acuerdo con el Tipo de Construcción De los diversos tipos de intercambiadores de calor, en esta parte solo se van a describir algunos de los más importantes y más usados a nivel industrial.

Descripción del equipo.

El intercambiador de calor de vidrio (ICV), que se encuentra en planta piloto cuenta con las dimensiones y características técnicas que se listan en la tabla 1. Para cualquier duda consultar el diagrama del anexo 1

Partes principales	Características y medidas
Tipo de vidrio	QVF
Diámetro exterior de la coraza tramo recto	11.45 cm
Diámetro exterior de la coraza extremos	13.52 cm
Longitud de la coraza	89 cm
Longitud de tubos	100 cm
Número de tubos	7
Diámetro interno de tubos	1.6 cm
Diámetro externo de tubos	1.8 cm
Arreglo de tubos	Triangular

COMPONENTES DEL EQUIPO DE INTERCAMBIO DE CALOR E VIDRIO



# Nombre del componente	Componente	# Nombre del componente	Componente
1	Intercambiador de calor	10	Rotámetro "R1"
2	Manguera / entrada de agua	11	Válvula de compuerta V-2
3	Manguera / salida de agua	12	Válvula de compuerta V-11
4	Manguera negra / entrada de vapor	13	Válvula de aguja V-6
5	Manguera roja / salida de vapor	14	Válvula de compuerta V-10
6	Purga / aire - agua	15	Indicador de temperatura "termómetro de carátula"
7	Entrada de agua de enfriamiento "EA1"	16	Indicador de temperatura "termómetro de carátula"
8	Entrada red de vapor	17	Indicador de presión "manómetro de carátula"
9	Purga / vapor		

Arreglo y espaciado de los tubos.

Los orificios de los tubos no pueden taladrarse muy cerca uno del otro, ya que una franja demasiado estrecha de metal entre los tubos adyacentes debilita estructuralmente el cabezal de tubos o espejo. Los tubos se colocan en arreglos ya sea triangulares o cuadrados, tal como se muestran en la siguiente figura.

siguiente figura. La ventaja del espaciado cuadrado es que los tubos son accesibles para limpieza externa y tienen pequeña caída de presión cuando el fluido fluye en la dirección indicada en la figura siguiente.



La ventaja del espaciado cuadrado es que los tubos son accesibles para limpieza externa y tienen pequeña caída de presión cuando el fluido fluye en la dirección indicada en la figura siguiente.

MATERIAL Y EQUIPO

EQUIPO

- Un Intercambiador de Calor de Vidrio, de Tubos y Coraza, Figura 2.
- Un Rotámetro.
- Una Válvula Reguladora de Presión.
- Tres Termómetros Uno de Mercurio y Dos Analógicos de Carátula.
- Dos Manómetros Analógicos de Carátula.
- Un Cronómetro.

MATERIALES Y HERRAMIENTAS

- Dos probetas de 2 L.
- Dos cubetas de 40 L.
- Un flexómetro, o una Cinta métrica,
- Una llave tipo Perico.

SERVICIOS

- Agua la línea, o de la Torre de Enfriamiento.

- Vapor de Generador de Vapor del Cuarto de máquinas.

EQUIPO DE SEGURIDAD DEL PROFESOR Y ALUMNOS QUE OPERAN EL EQUIPO.

- Bata, casco y zapato cerrado,
- Un par de guantes de carnauba

MATERIAL BÁSICO

El especificado por el profesor

PROCEDIMIENTO

La unidad fue diseñada para mostrar el balance de calor global en un intercambiador de calor de tubos y coraza, opera como condensador usando vapor y agua de forma horizontal, aunque por el diseño el equipo puede colocarse en posición vertical o intermedia.

- Especificaciones:

1.- La alimentación de agua fría pasa por un rotámetro, entra a un cabezal de entrada, con tres bridas de acero inoxidable, con espárragos metálicos de ajuste para fijarlo al cuerpo de la coraza, por la que pasan a siete tubos de vidrio que descargan al cabezal de salida con tres bridas de acero inoxidable con espárragos de ajuste, Nota (el cabezal de entrada se rompió y actualmente se usa un cono de acero inoxidable). El número de tubos del equipo es de siete tubos, con siete deflectores de teflón. El agua calentada de salida sale a una rejilla de drenaje. A contracorriente pasa por la coraza vapor. El vapor que entra pasa a una válvula reguladora de presión que está conectada a un manómetro de carátula y a un termómetro de carátula, a la salida del vapor condensado hay una trampa de vapor para medir la cantidad y temperatura de condensado que sale

2-Las especificaciones técnicas del fabricante son:

- El vidrio de equipo, tipo: *QFV*,
- Máxima presión de agua de servicio: 3.5 kgcm^2 ,
- Rango de presión de vapor de operación: $(1.0-3.5) \text{ kgcm}^2$

- Área de transferencia de calor: 0.5 m^2
- Coeficiente total de transferencia de calor, aprox.: $250 \text{ Kcalhrm}^2\text{°C}$,
- Capacidad térmica: $(5000-8300)\text{Kcalhr}$,
- Consumo de vapor: 15.3 kg/hr
- Consumo de agua: 1 L/hr
- Capacidad del rotámetro: 1 L/hr
- La temperatura de agua de servicio se hace con un termómetro de carátula a la entrada y otro de mercurio en el termo pozo de salida del equipo. Las temperaturas de entrada y de salida del vapor se realiza con dos termómetros, también se puede emplear un manómetro de carátula y con un manómetro y una tabla de presión vapor a la presión de la Ciudad de México, se puede ver la temperatura de salida. o con bien con el termómetro de mercurio.
- El consumo de potencia de los recursos de servicio es. Para el vapor de agua: 3.5 kgcm^2 , para el agua el rotámetro da un valor máximo de: 1 L/hr
- Las dimensiones aproximadas del equipo son: Altura 2.4 m , área a piso: $(1.00 \times 0.70) \text{ m}^2$
- El diámetro externo de los tubos es de $1.053''$ con una longitud de 79 cm ; los deflectores de teflón son circulares con espaciamiento entre ellos de 10 cm : el diámetro externo de la coraza de $4.5''$, con una longitud de 0.88 m .
- El equipo está montado en una estructura metálica tubular, anclada al piso, la parte media del soporte del equipo está unido a dos chumaceras con baleros para que gire el equipo, con guías de apoyo para que el equipo se quede en posición horizontal, vertical o intermedia.
- En la Figura 2, muestra el equipo en posición horizontal y las tuberías e instrumentos más importantes.

A.- Arranque

- 1.- Familiarizarse con el equipo, observando un esquema de este en la Figura 2.
- 2.- Cerrar todas las válvulas,
- 3.- Abrir el suministro de agua de la torre de enfriamiento al equipo, con las válvulas V-1 y V-2. Así como alinear las válvulas de la torre de enfriamiento, de salida y su retorno.

- 4.- Calibrar el rotámetro, a diferentes aperturas, midiendo el porcentaje de descarga de (0 a 100) %, a diversas vueltas de apertura de la válvula V-2,
- 5.- Con un cronómetro medir el tiempo que tarda en llenar los recipientes de bajo volumen como probetas y los de mayor capacidad como cubetas, lo que indica el flujo o caudal medido con la apertura de la válvula V-3.

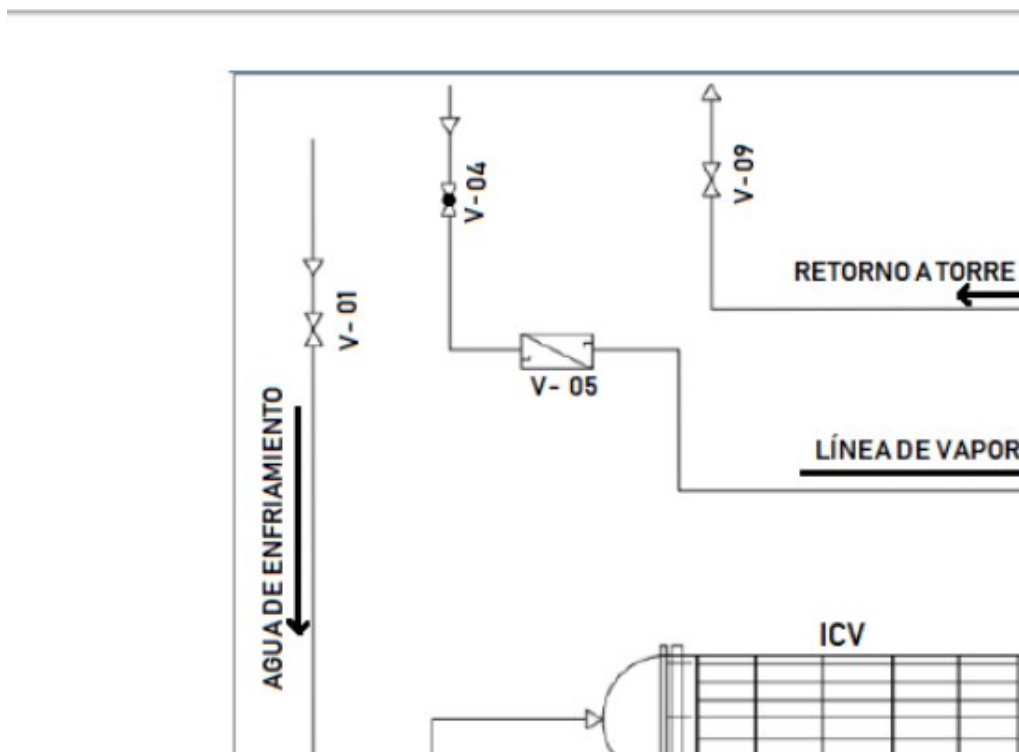


Figura 2. Esquema del equipo de intercambio de calor

- 6.- Abrir la válvula V-4 para el suministro de vapor a la coraza del equipo pasa el flujo a una válvula reguladora de presión, V-5, ajustando la presión con un manómetro de carátula, de manera que la presión de vapor en el equipo este abajo de 3.5 kgcm^2 , que es la recomendada por el fabricante, por ser vidrio el material de construcción.
- 7.- Abrir la válvula V-6, el vapor pasa por un manómetro y a un termómetro de carátula para después a la salida del condensado descargar a una trampa de vapor, y medir con más exactitud la temperatura de condensado, abriendo periódicamente la válvula V-7, con un termómetro de mercurio.
- 8.- Medir la temperatura del agua caliente que sale del cabezal de los tubos de agua caliente del equipo, con un termo pozo con un termómetro de mercurio, que tiene el equipo.

9.- Abrir las válvulas V-8 y V-9, para regresar el agua calentada a la torre de enfriamiento.

10.-Tomar las temperaturas del agua y del vapor a la entrada y salida del intercambiador, así como la presión de entrada de vapor.

11.-Variar los gastos de agua de entrada al equipo con el rotámetro a diversas aperturas de la válvula V-2.

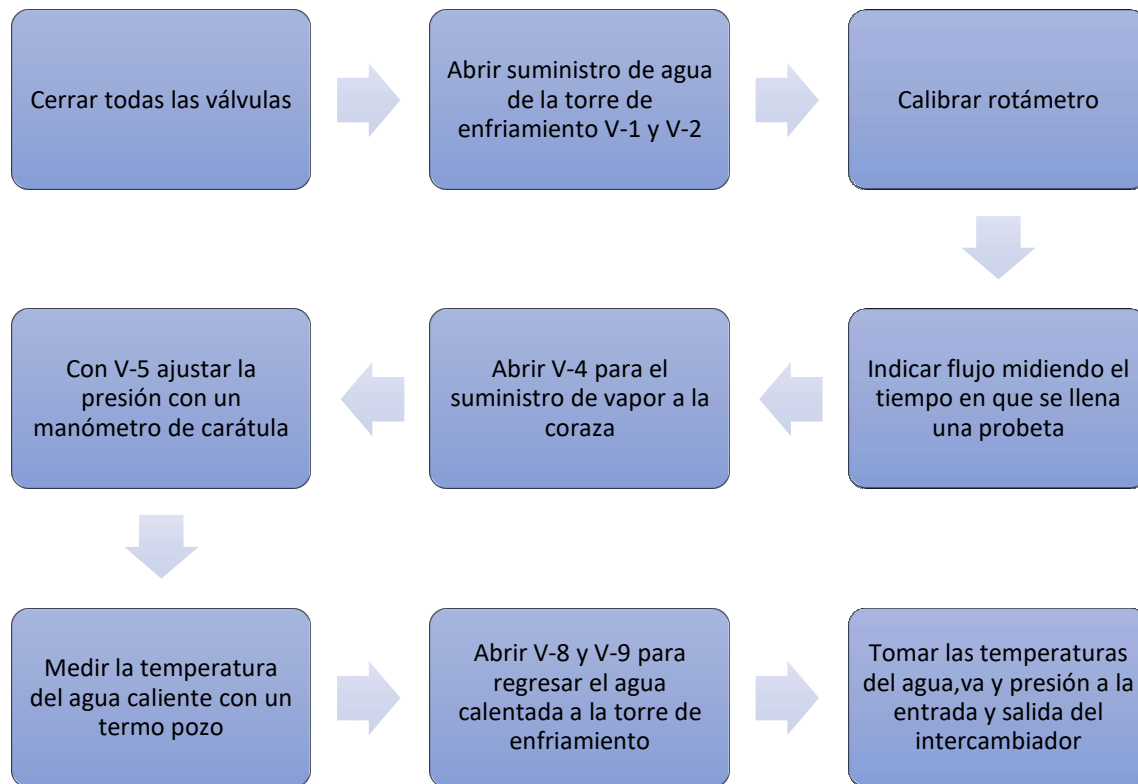
12.-Variar los gastos de vapor con la válvula reguladora de presión y la válvula V-4, a una presión regulada definida de la válvula V-5,

13.-Repetir los incisos 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12. Para obtener los datos experimentales que se presentan en las Tablas de Tratamiento de Datos y Análisis de los Datos, que se verán posteriormente.

B.- Paro

1. Cerrar el suministro de vapor por medio de la válvula V-4 y V-6, observando que el manómetro ya no indique presión de vapor, así que la temperatura del termómetro de carátula sea la ambiental y que deje de salir vapor por la trampa de vapor. Dejar de circular el agua, hasta que la temperatura en la coraza sea igual a la temperatura ambiente.

2. Cerrar las válvulas de entrada de agua V-1, y V-2. Así como de salida V-8, V-9. Abrir todas las válvulas de drene de agua y condensados, V-3, V-7, V-10 y V-11, para que no quede agua en el equipo ni en las tuberías.



Nota: (En Aclaraciones se mencionan propuestas para evitar el problema que existe en el equipo de quedarse al arranque y paro con agua).

- a. Con cada corrida del inciso 14, se toman los datos a un gasto y las temperaturas, medidas del agua, así como del vapor-condensado: Se repiten por lo menos seis veces los datos para obtener una Tabla y emplear sus valores promedio
- b. b. En la Tabla de resultados se ponen escalas de aperturas de % del rotámetro, a una presión determinada. Y sus valores promedio.
- c. c. Se realiza la Tabla de resultados de temperaturas a la entrada y salida del agua y del vapor, manteniendo una apertura 0 % de caudal del rotámetro fijo y se varía el consumo salida del condensado de vapor

Tratamiento de datos

Tabla 1. Resultados obtenidos del uso de intercambiador de calor de vidrio

No Corrida	Gasto másico de aguade enfriamiento (kg/s)	$T_{entrada}$, de agua (°C)	T_{salida} , de agua (°C)	$T_{entrada}$, de vapor (°C)	T_{salida} , de condensado (°C)
1	.4528	18.5	25	114	101
2	.3773	19	26	116	104
3	.3446	18	26.5	116	102
4	.2584	18	27	117	98
5	.2450	18	28	118	100

Tabla 2. Datos necesarios para el análisis de datos

D interno (m)	0.128	k H ₂ O (W/(m·K))	0.58
D externo (m)	0.018	g m/s ²	9.80665
S i (m ²)	0.0208	λ kj/kg	2257
ρ H ₂ O kg/m ³	1000	Nt	7
μ H ₂ O kg/m*s	0.001	A (m ²)	0.5

Los cálculos para el diseño de un intercambiador de calor se basan en la ecuación de Fourier, esta es:

$$Q=U \cdot A \cdot \Delta T$$

Si la ecuación anterior se aplica a un elemento diferencial del intercambiador, la transferencia de este se expresa como:

$$dQ= U \cdot \Delta T \cdot dA$$

O

$$Q=U \cdot A \cdot [\Delta T_2 - \Delta T_1 \ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}] = U \cdot A \cdot (MLDT)$$

Puesto que Q es igual a $\Delta T \Sigma R$, se tiene:

$$\Sigma R = \frac{1}{h_i} + \frac{L_m}{k_m} + \frac{1}{h_o}$$

Tabla 3. Cálculo del diferencial de temperaturas en el intercambiador

Número de corridas	ΔT_1 (°K)	ΔT_2 (°K)	ΔT_{ml}
1	89	82.5	
2	90	85	
3	89.5	84	
4	90	80	
5	90	82	

Determinación de los coeficientes de película

Tabla 4. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor en los tubos

Número de corridas	#Re	hiD/K	$h \left(\frac{^{\circ}K}{Watts} \right)$
1	2786.461538	2.07331611	9.39471363
2	2321.846154	1.95219434	8.84588062
3	2120.615385	1.89465633	8.58516149
4	1590.153846	1.72295102	7.80712183
5	1507.692308	1.69293862	7.67112812

Tabla 5. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor en la coraza

Número de corridas	$w/D0*\mu$	$h \left(\frac{^{\circ}K}{Watts} \right)$
1		
2		
3		
4		
5		

Tabla 6. Coeficiente de transferencia de calor entre la superficie externa de un banco de tubos horizontales y vapor.

Número de corridas	$h \left(\frac{^{\circ}K}{Watts} \right)$
1	

2	
3	
4	
5	

Tabla 7 cálculo de resistencias totales

Número de corridas	Tubos $\frac{1}{h} \left(\frac{1}{k} \right)$ watts	Coraza $\frac{1}{h} \left(\frac{1}{k} \right)$ watts	Banco horizontal $\frac{1}{h} \left(\frac{1}{k} \right)$ watts
1			
2			
3			
4			
5			

Tabla 8. Cálculo de Calor transferido

Número de corridas	$\Sigma 1/U$	$U \frac{W}{m^2K}$	Q
1			
2			
3			
4			
5			

En base a la ecuación 16 con la que se obtuvo el flujo de calor aportado por el agua con respecto a cada corrida al vapor teórico (Q). Considerando un Cp de 4.18 KJ/Kg K y con una densidad de 999.98 Kg/m³:

$$Q = wf \cdot Cpf \cdot (T1 - T2) \quad (16)$$

Sustituyendo y despejando el coeficiente de transferencia global de la ecuación 22 se obtienen los siguientes resultados.

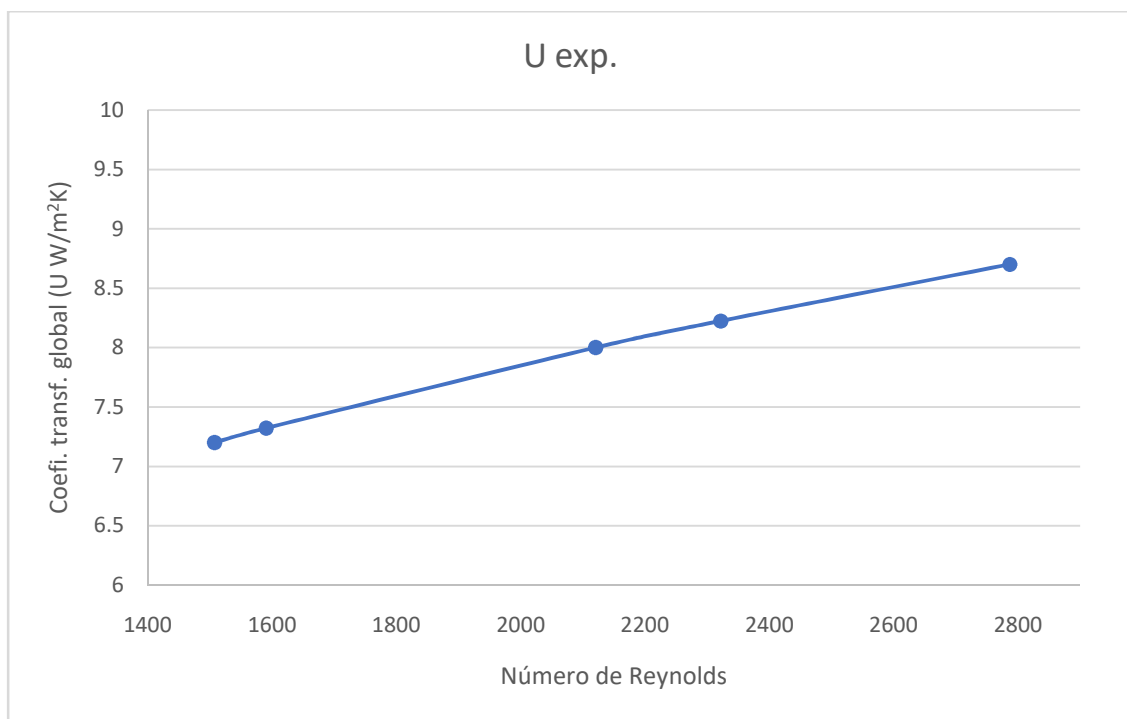
$$Q = U \cdot A \cdot [\Delta T2 - \Delta T1 \ln \Delta T2 \Delta T1] = U \cdot A \cdot (MLDT) \quad (22)$$

$$U = \frac{Q}{A \cdot MLDT}$$

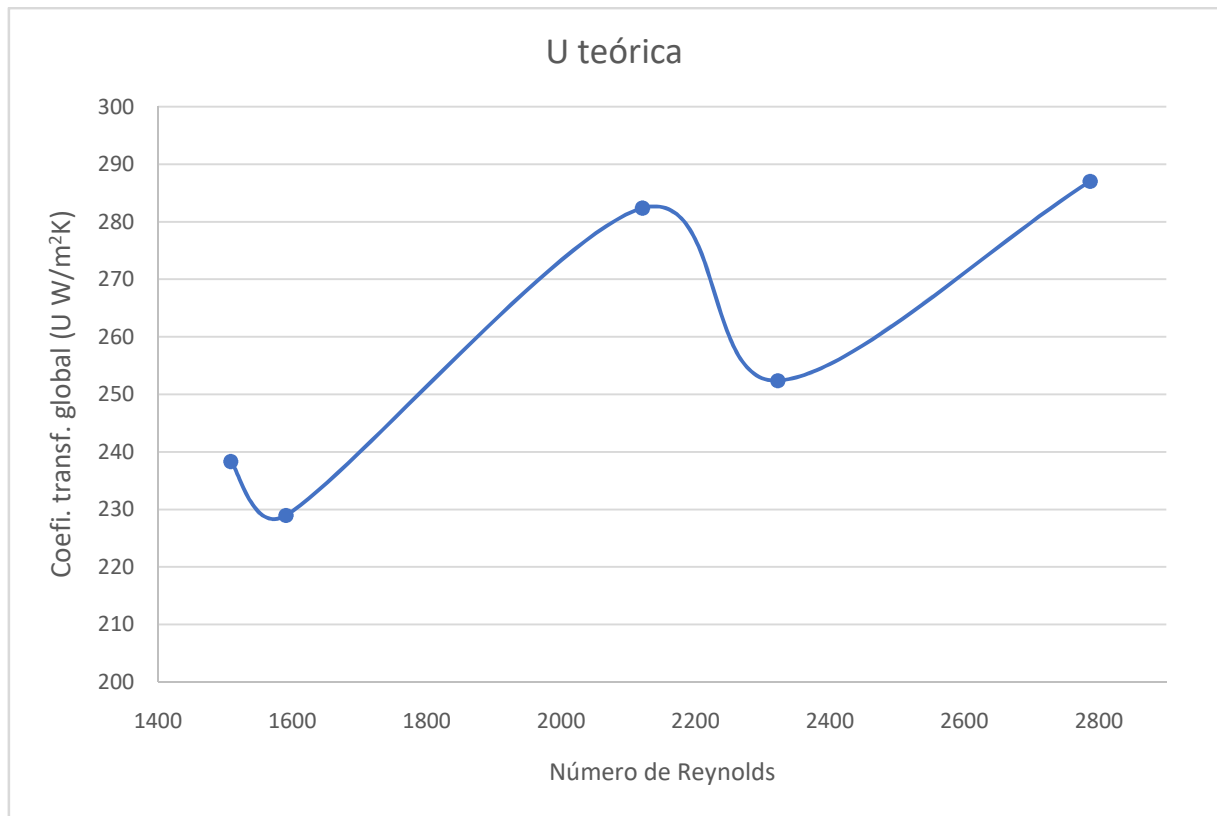
Corrida	Q(m ³ /s)	wf (Kg/s)	ΔT (K)	Q (J/s)	MLDT (K)	U (W/m ² K)
---------	----------------------	-----------	----------------	---------	----------	------------------------

1	0.00045	0.4527				
2	0.00037	0.3772				
3	0.00034	0.3445				
4	0.00025	0.2583				
5	0.00024	0.2449				

Gráfica 1. U_{exp} vs Re_{tubos} ,



Grafica 2. U teórico vs Re tubos.



Análisis de los resultados.

Conclusión.

Anexo 1.



Imagen 1. Sistema de estudio, intercambiador de calor de vidrio de la planta piloto de la FES Zaragoza



Imagen 2. Apertura de la válvula de vapor de agua

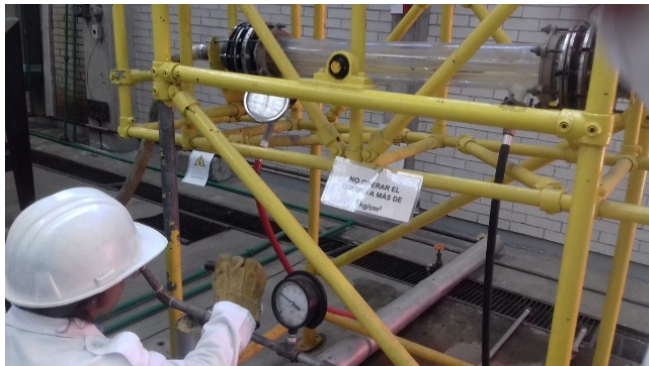


Imagen 3. Regulación de la presión en el intercambiador



Imagen 4. Lectura de datos de temperatura de entrada y salida de vapor/ condensado y agua de enfriamiento

Bibliografía

*Froztec International Inc. (2020). ¿Cómo funciona un Intercambiador de Calor en un sistema de refrigeración?. 9/febrero/2020, de Froztec Sitio web:
<https://www.froztec.com/como-funciona-un-intercambiador-de-calor-en-un-sistema-de-refrigeracion>

* Paguay, Paredes, Quisintuña. (2012). Intercambiadores de Calor. 9/febrero/2020, de Escuela superior politecnica de Chimborazo Sitio web:

<https://es.slideshare.net/kof2002plus/termodinmica-intercambiadores-de-calor>

*Çengel, Yunus A (2011).Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones. México. McGraw-Hill Interamericana,1

* Levenspiel J. Octave. (2002) Flujo de fluido e intercambio de calor.

* Kern, Donald. (1988) “Procesos de transferencia de calor”. Editorial continental S. A. México.

* McCabe L. Warren. (2007) Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. McGraw-Hill. 7ª Edición, D.F. México.