

DESARROLLO DE EQUIPAMIENTO Y METODOLOGÍAS PARA EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN FLUIDOS SIN CAMBIO DE FASE.

CARULLO, C. A.¹, CASTRO, D. A.¹, RUBIO, L. A.¹, MARTINEZ, S.A.¹

¹Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria, Universidad Nacional de Cuyo. Bernardo de Irigoyen 375 Santa Rafael, Mendoza. email: ccarullo@fcai.uncu.edu.ar

RESUMEN

Los procesos industriales y de servicios que involucran transferencia de calor entre fluidos sin cambio de fase, ya por necesidad de calentamientos, de enfriamientos y/o de provocar nuevos intercambios térmicos, suelen ser factor controlante de los mismos. Su estudio contribuirá a un consumo energético más eficiente. En el presente trabajo se selecciona los parámetros significativos para transferencia de calor sin cambio de fase en convección forzada, y se diseñan metodologías e instalaciones para su evaluación experimental. Se logra el diseño, implementación, montaje y operación de un equipamiento con capacidad de medir la velocidad de transferencia de calor sin cambio de fase, en fluidos newtonianos. Construido el mismo, se verifica y ajusta su desempeño con agua en las condiciones operativas de experimentación. Se está en condiciones de implementar el diseño experimental propuesto. Lo que permitirá la verificación de modelos vigentes de uso generalizado y la posibilidad de elaborar modelos alternativos.

1. MARCO TEÓRICO

La reactivación productiva ocurrida en actividades primarias, industriales y de servicios puso de manifiesto la importancia de proveer recursos humanos, científicos y tecnológicos así como prever un racional abastecimiento y consumo de energía. Lo sigue requiriendo la aspiración legítima a un diversificado desarrollo propio y las oportunidades de intercambio fronteras afuera, en el ámbito del Mercosur y con el resto del mundo.

El intercambio de calor entre fluidos sin cambio de fase interviene junto a servicios de calentamiento por condensación y servicios de enfriamiento por ebullición. Es de interés práctico enfocar la atención en los procesos donde el factor controlante de la transferencia lo constituye el calentamiento o el enfriamiento de un fluido sin cambio de fase.

Las ecuaciones de predicción de convección forzada más difundidas fueron generadas para fracciones y compuestos relacionados con el petróleo y aceites de origen fósil, y durante años se extendió su uso a condiciones y fluidos diversos. Desde que en 1928 Morris, F. y Whitman, W.G. (Kern, 1965) abordaran la evaluación de ajuste experimental para predecir coeficientes peliculares de transferencia de calor, a partir del análisis adimensional para fluidos newtonianos en convección forzada, numerosos trabajos experimentales han generado una colección de modelos predictivos. Son de uso generalizado el modelo de Dittus-Boelter (1930) y el de Sieder y Tate, (1936); ampliamente difundidos en libros de grado (Kreith y Bohn, 2001), (Cao, 2006) y otros.

La velocidad de transferencia de calor en condiciones de convección forzada depende de factores tales como: propiedades termofísicas, propiedades reológicas, condiciones hidrodinámicas de flujo, geometría del intercambiador, rugosidad de la superficie de intercambio, entre otras. (Ditchfield y col., 2006). Este comportamiento se refleja en los modelos y ecuaciones más usados.

La iniciativa de este trabajo parte de la necesidad de revisar cuánto ajustan los modelos de predicción en uso al comportamiento de fluidos específicos de interés.

2. OBJETIVOS

Este trabajo propone discutir y diseñar metodologías para la evaluación experimental de parámetros de transferencia de calor; propone desarrollar, construir y montar equipamiento e instalaciones para medir la transferencia de calor sin cambio de fase en fluidos newtonianos; propone verificar y ajustar el desempeño de todo el equipamiento con agua en las condiciones operativas de estudio.

3. METODOLOGÍA

3.1. Descripción de equipamiento e instalaciones

La instalación principal cuenta con un intercambiador de experimentación del tipo doble tubo. Por su interior circula el fluido en estudio, mientras que por ánulo lo hace el fluido de servicio. El servicio de calentamiento emplea agua en su circuito térmico, lo que permite -en el rango de temperaturas de experimentación- flexibilidad para ajustar temperaturas y gradiente impulsor. El circuito caliente cuenta con una bomba centrífuga de 1 HP alimentada desde un tanque de PPHD de 220 litros de volumen máximo y envía el fluido hacia el ánulo del equipo doble tubo principal circulando previamente por un medidor de caudal volumétrico. Posee un retorno que cierra el circuito. El aporte térmico se logra a través de un intercambiador de fuego directo calentado por gas natural al que se suma una resistencia eléctrica de 2 KW que trabaja en lazo de control cerrado. El tubo externo construido en acero inoxidable AISI 304, tiene una longitud de 3000 mm, diámetro exterior de 50.8 mm y espesor de 2.00 mm.

En la operación de calefacción el circuito del fluido en estudio es impulsado por una bomba centrífuga de $\frac{3}{4}$ HP alimentada desde una tanque de PPHD de 220 litros de volumen máximo y envía el fluido hacia el tubo interno del equipo doble tubo circulando previamente por un rotámetro que permite ajustar el flujo a derivar. Posee además un retorno que cierra el circuito y que intercala un segundo intercambiador tubular que actúa como enfriador complementario y restablece la temperatura de ingreso de fluido de proceso. El tubo interno construido en acero inoxidable AISI 304 tiene una longitud de 4000 mm, diámetros exterior de 21.5 mm e interior de 17.5 mm.

El sistema eléctrico cuenta con un tablero principal de accionamiento, protección y comando, y un tablero secundario de medición de temperatura provisto de 7 (siete) controladores de temperatura PID marca NOVUS Modelo 480DX con entrada múltiple y salida ON/OFF. El equipo cuenta con 7 (siete) sondas de medición de temperatura del tipo termo resistencia Pt100 marca XTRONICS, con vaina de acero inoxidable AISI 316, de 6 mm de diámetro y 100 mm de longitud y cabeza DIN, montadas en puntos adecuados de la instalación. Se dispone de dos sondas para medir la temperatura T1 de la corriente de entrada y la temperatura T2 de la corriente de salida del fluido caliente, y dos sondas para medir la temperatura t1 de la corriente de entrada y la temperatura t2 de la corriente de salida del fluido de estudio. Se ubica tres sondas desde el espacio anular convenientemente espaciadas, para medir las temperaturas de pared externa del tubo interno designadas como Tw1, Tw2 y Tw3.

El emplazamiento de las sondas para medir la temperatura de pared T_w se construyó de tal modo que evite el contacto entre éstas y los fluidos frío y caliente tal que permita que cada sonda sólo tome contacto con la superficie externa de la pared del tubo.

Se mecanizaron y montaron dos cabezales de sello hidráulico en material polimérico GRYLON® provistos de cuatro juntas tóricas o anillos o-ring cada uno, como elemento que asegure la estanqueidad tanto del fluido que circule por tubo como del que lo hace por el espacio anular. Los o-rings o juntas tóricas, piezas en forma de anillo o aro, de sección circular, están fabricados en compuesto elastomérico silicón Vitón®. El sellado se produce por efecto de la restricción del o-ring en su alojamiento, y al deformarse dentro de la cavidad mecanizada a tal fin, ocupa los espacios libres, bloqueando las posibles filtraciones.

El emplazamiento de doble tubo cuenta además con dos conjuntos centradores ubicados a 1000 mm desde cada extremo del tubo externo. Cada conjunto centrador está formado por tres tornillos $3/8'' \times 1''$ con su correspondiente contratuerca y contrados en acero inoxidable AISI 316 distribuidos radialmente a 120° en la sección transversal correspondiente. De esta forma se asegura que los tubos se mantengan centrados sin afectar los patrones de circulación de fluidos. La Figura 1 muestra la configuración experimental.

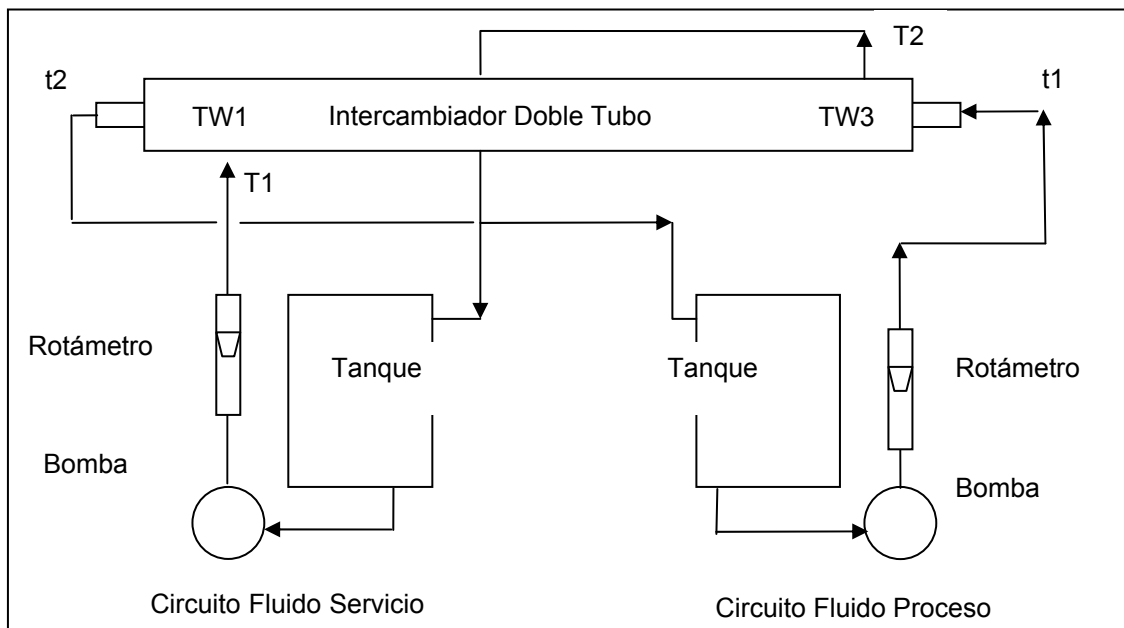


FIGURA 1: Esquema de la configuración experimental.

3.2. Diseño experimental

Para la experimentación con agua se propone un Diseño Factorial Multinivel 3^2 con 2 variables y 3 niveles fijando como factores o variables independientes:

- 1- caudal volumétrico indicativo del fluido en estudio w_{EV} , fijando tres niveles 400, 600 y 800 LPH (litros por hora), que corresponden a régimen hidráulico turbulento, que será medido y validado como flujo másico w_E con ayuda de balanza y cronómetro, y
- 2- temperatura consigna de fluido caliente $T1_{sp}$ en tres niveles: 55 °C, 50 °C y 45 °C.

Para la experimentación con soluciones acuosas de sacarosa se propone un Diseño Factorial Multinivel 3^3 con 3 variables y 3 niveles fijando como factores o variables independientes, y en un primer conjunto de corridas los niveles serán:

- 1- caudal volumétrico indicativo del fluido en estudio w_{EV} , fijando tres niveles 400, 600 y 800 LPH (litros por hora), que corresponden a régimen hidráulico turbulento, que será medido y validado como flujo másico w_E con ayuda de balanza y cronómetro,
- 2- temperatura consigna de fluido caliente $T1_{sp}$ en tres niveles: 55 °C, 50 °C y 45 °C.
- 3- concentración de sólidos disueltos en el fluido en estudio Bx fijando tres niveles 5 °Bx, 10 °Bx y 15 °Bx.

En ambos diseños factoriales se sigue la evolución temporal de las siete sondas de temperaturas montadas en la instalación, generando las correspondientes series de tiempo. En los dos se calcula como variable dependiente, el coeficiente pelicular convectivo interior a tubo para el fluido en estudio h_i expresado en W/m² K

TABLA 1: Resumen Diseño experimental.

FLUIDO: AGUA						
Variables Independientes	Niveles			Diseño	Experim	Variable Respuesta
Caudal w_E [LPM]	400	600	800	3^2	9	h_i
Temperatura $T1_{sp}$ [°C]	55	50	45			

FLUIDO: SOLUCIONES SACAROSA						
Variables Independientes	Niveles			Diseño	Experim	Variable Respuesta
Caudal w_E [LPM]	400	600	800	3^3	27	h_i
Temperatura $T1_{sp}$ [°C]	55	50	45			
Concen. Inicial [°Bx]	5	10	15			

3.3. Estrategias metodológicas

La estrategia metodológica propuesta tiene una etapa previa de tratamiento y acondicionamiento de datos, y una etapa final de cálculo y verificación.

Estrategia metodológica de acondicionamiento de datos

Para hacer consistentes los datos en bruto obtenidos de las corridas experimentales se propone un tratamiento previo basado fundamentalmente en la verificación del estado estacionario y equiespaciado de los datos, con estimación de las oscilaciones máximas del sistema. Se incluye también la discusión, y eliminación de períodos temporales tran-

sitorios y la selección de intervalos de estado permanente o estacionarios. La estrategia de esta etapa se puede observar en la Figura N°2.

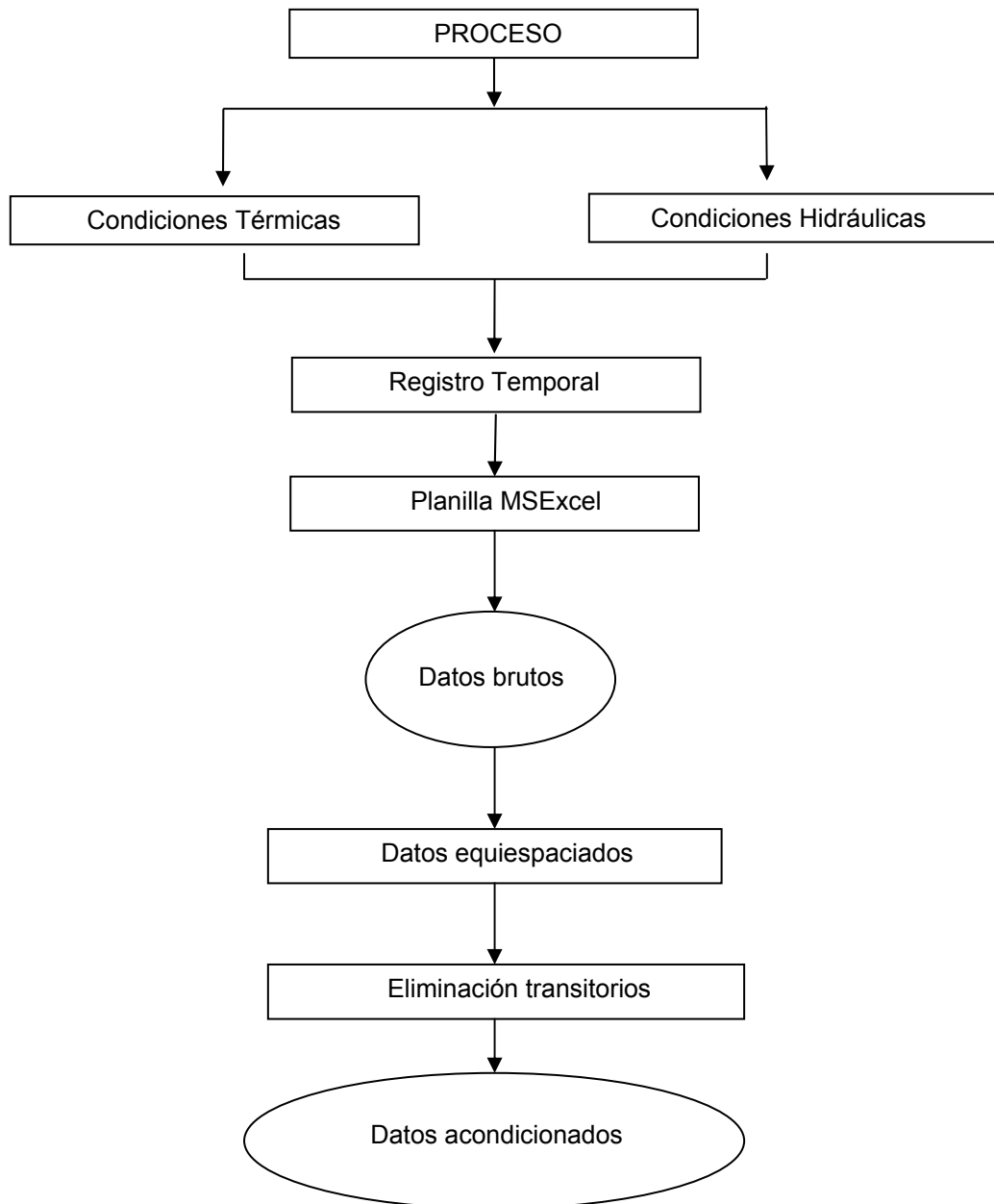


FIGURA 2: Metodología de Tratamiento de Datos.

A partir de la serie de tiempo de las mediciones de temperatura y flujo, se selecciona un intervalo de datos tratados y acondicionados del que resultan los valores de régimen estacionario que se utilizarán en el cálculo.

Estrategia metodológica de cálculo

Los modelos predictivos actualmente vigentes toman la forma de la ley de potencia siguiente:

$$Nu = \alpha * R_E^p * P_R^q \quad (1)$$

emergente del análisis dimensional. Algunos autores complementan tales modelos incorporando un factor que tiene en cuenta la variación de las propiedades termofísicas con la temperatura según:

$$Nu = \alpha * R_E^p * P_R^q * \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^n \quad (2)$$

El desafío experimental consiste en estimar el coeficiente y los exponentes respectivos, planteando la necesidad de calcular para cada corrida los números adimensionales involucrados. El balance de energía para el fluido en estudio establece que:

$$q = w_E * \overline{C_p} * (t_2 - t_1) \quad (3)$$

siendo:

q : flujo de calor intercambiado por el fluido en estudio, [W],

w_E : flujo másico de fluido en estudio, [Kg/s],

C_p : calor específico evaluado a la temperatura media entre entrada y salida, [J/Kg K],

t_2 : temperatura de fluido en estudio a la salida, [°C],

t_1 : temperatura de fluido en estudio a la entrada, [°C].

El coeficiente convectivo pelicular de lado interior de tubo, resulta:

$$\overline{h} = \frac{q}{\pi * d_i * L * DMLT_{cc}} \quad (4)$$

siendo:

h : coeficiente pelicular convectivo promedio referido a la superficie interior del tubo, [W/m² K],

d_i : diámetro interior del tubo, [m],

L : longitud efectiva de la transferencia térmica, [m],

$DMLT_{cc}$: diferencia media logarítmica de temperatura, [°C], evaluada en base a los gradientes efectivos en los extremos calefaccionados del tubo interno entre las respectivas temperaturas de pared interior y las del fluido de estudio según la ecuación:

$$DMLT_{cc} = \frac{(tw1 - t2) - (tw3 - t1)}{\ln \frac{(tw1 - t2)}{(tw3 - t1)}} \quad (5)$$

siendo:

$tw1$: temperatura de pared interior del tubo, a partir de T_{w1} medida.

$tw3$: temperatura de pared interior del tubo, a partir de T_{w3} medida.

4. RESULTADOS

Se logró el diseño, implementación, montaje y operación de un equipamiento con capacidad de medir la velocidad de transferencia de calor sin cambio de fase, en fluidos newtonianos, que permitirá la verificación de modelos vigentes de uso generalizado y la posibilidad de elaborar modelos alternativos. En la experimentación preliminar con agua se verificó el desempeño de todo el equipamiento en las condiciones operativas de estudio. Esto permitió hacer ajustes tanto de estanqueidad como de tipo metodológico experimental. Al efectuar el tratamiento y acondicionamiento de datos a las corridas preliminares realizadas con agua, se pudo observar la necesidad de ajustar parámetros operativos para cumplir con el estado estacionario. Superada esta instancia y evaluados los nuevos datos se calcularon los coeficientes peliculares convectivos para régimen turbulento dando valores dentro de los rangos esperados. Con tales ajustes, se está en condiciones de implementar el diseño experimental propuesto.

5. CONCLUSIONES

Se pudo desarrollar y construir equipamiento y metodologías para la evaluación experimental de parámetros de transferencia de calor en convección forzada sin cambio de base, comprobando la factibilidad de lograrlo. Asimismo se verificó y ajustó el desempeño de todo el equipamiento con agua en las condiciones operativas de estudio.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bird, R.B.; Stewart, W.E.; Lightfoot, E.N. (2001) Fenómenos de Transporte. Ed. México, Reverté Ediciones.
- Morris, F.H.; Whitman, W.G. (1928), Heat Transfer for Oils and Water in Pipes. Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 20, N° 3, 234-240.
- Sieder, E.N.; Tate, G.E. (1936), Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes. Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 28 N° 12, 1429-1435.
- Ditchfield, C.; Tadini, C.C.; Singh, R.K.; Toledo, R.T. (2007), Heat transfer during thermal processing of a temperature dependent non-Newtonian fluid in a tubular heat exchanger. Chemical Engineering and Processing, 46, 472-476.
- Kreith, F; Bohn, M.S. (2001), Principios de transferencia de calor. 6ta.Ed. México, Thomson Learning.
- Cao, E. (2006), Transferencia de calor en ingeniería de procesos. 2da Ed. Buenos Aires, Nueva Librería.
- Kern, D.Q. (1965), Procesos de Transferencia de Calor, México, 1ª ed. C.E.C.S.A