

2
24



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**ESTUDIO SOBRE TRANSFERENCIA DE CALOR EN
INTERCAMBIADORES DE CALOR DE LECHO
FLUIDIZADO LIQUIDO-SOLIDO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

JAVIER EDUARDO AGUILLON MARTINEZ

DIRECTORES DE TESIS:

ING. CARLOS OROZCO FERREYRA

DR. JAVIER SIQUEIROS ALATORRE

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1980

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

NOMENCLATURA	
INTRODUCCION	
1.- GENERALIDADES	1
a.- Introducción.	2
b.- Principios básicos de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido.	4
c.- Clasificación de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido.	7
d.- Comparación de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado con los intercambiadores de calor convencionales.	11
2.- REVISION BIBLIOGRAFICA	13
a.- Introducción.	14
b.- Hidrodinámica.	14
c.- Transferencia de calor.	20
d.- Análisis bibliográfico.	36
3.- DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL	38
a.- Introducción.	39
b.- Consideraciones preliminares al diseño del intercambiador de calor de lecho fluidizado vertical experimental.	39
c.- Diseño del intercambiador de lecho fluidizado vertical experimental.	40
d.- Diseño de la instalación del intercambiador de calor de lecho fluidizado vertical experimental.	48
e.- Descripción de las instalaciones de los equipos experimentales que se encuentran operando.	57
4.- PRUEBAS EXPERIMENTALES	63
a.- Introducción.	64
b.- Diseño de pruebas experimentales.	64
c.- Secuencia de operación.	70
d.- Descripción de las pruebas.	72
e.- Datos experimentales obtenidos.	78

5.- RESULTADOS	82
a.- Introducción.	83
b.- Resultados de pruebas sin partículas.	83
c.- Resultados de pruebas con partículas.	88
d.- Comparación de los resultados experimentales con los modelos existentes en la literatura.	102
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
BIBLIOGRAFIA	119
ANEXO 1	122
ANEXO 2	127
ANEXO 3	131

NOMENCLATURA

A	-	Constante de la ecuación (5.1) [adimensional]
A_c	-	Area de la sección transversal de la columna [m ²]
A_t	-	Area de transferencia de calor [m ²]
C	-	Constante de la ecuación (5.1) [adimensional]
d	-	Diámetro de partícula en micrones
d_p	-	Diámetro de la partícula [m]
D_t	-	diámetro del tubo [m]
F	-	Constante ecuación (5.26) [adimensional]
G	-	Flujo másico [kg/s]
h	-	Coefficiente de transferencia de calor [kW/m ² ·C]
h_c	-	Coefficiente convectivo de transferencia de calor de la suspensión [kW/m ² ·C]
h_p	-	Coefficiente convectivo de transferencia de calor debido a la presencia de partículas [kW/m ² ·C]
J	-	Factor de Colburn [adimensional]
j^*	-	"Drift velocity" ecuación (5.22) [m/s]
j_1	-	Velocidad relativa ecuación (5.21) [m/s]
J_c	-	Factor de Colburn de la suspensión [adimensional]
j_f	-	Velocidad superficial [m/s]
J_p	-	Factor de Colburn considerando la presencia de la partícula [adimensional]
k	-	Conductividad térmica [kW/m·C]
L_f	-	Altura del lecho [m]
LMTD	-	Diferencia media logarítmica de temperatura [°C]
masa	-	Cantidad de partículas [kg]
n	-	Pendiente de la gráfica Log Reynolds vs Log J (Colburn)

Nu	-	Número de Nusselt [adimensional]
Pr	-	Número de Prandtl del agua [adimensional]
Pr _c	-	Número de Prandtl de la suspensión [adimensional]
Q	-	Calor transferido [kW]
Re	-	Número de Reynolds [adimensional]
Re _p [*]	-	Número de Reynolds de la partícula [adimensional]
Re _{sus}	-	Número de Reynolds de la suspensión [adimensional]
Re _T	-	Número de Reynolds terminal [adimensional]
V	-	Velocidad [m/s]
V _T	-	Velocidad terminal [m/s]
X	-	Dimensión característica [m]

LETRAS GRIEGAS

ρ	-	Densidad del agua [kg/m ³]
ρ _{aparente}	-	Densidad aparente de la partícula [kg/m ³]
ρ _c	-	Densidad de la suspensión [kg/m ³]
ρ _{real}	-	Densidad real de la partícula [kg/m ³]
ΔH	-	Diferencia de entalpías [kJ/kg]
ε	-	Porosidad [adimensional]
μ	-	Viscosidad [kg/ms]
μ _c	-	Viscosidad de la suspensión [kg/ms]
φ	-	Factor de esfericidad [adimensional]

INTRODUCCION

En la actualidad, el ahorro y aprovechamiento integral de la energía es de vital importancia para evitar su rápido agotamiento. Es por esta cuestión que se deben buscar métodos para hacer más eficientes los sistemas industriales, de transformación, de generación y de servicios. El presente trabajo continua con los estudios tendientes a obtener un mejor aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpia, los cuales van encaminados al estudio de intercambiadores de calor no convencionales, como son "los intercambiadores de calor de lecho fluidizado liquido-sólido" (ICLF L-S).

Para cubrir los aspectos más relevantes en este campo en una forma comprensible, este estudio se organizó en cinco capítulos. En el capítulo uno se mencionan los antecedentes en los cuales se basa el estudio hidrodinámico y de transferencia de calor de los ICLF L-S, así como una comparación general con los intercambiadores de calor convencionales. El capítulo dos trata de una revisión profunda de los artículos más relevantes que se han publicado acerca de este tema, presentando las propuestas planteadas a la solución del mismo.

La clasificación de los ICLF L-S se hace mediante intercambiadores de calor de lecho fluidizado verticales y horizontales, de lo anterior se parte para dirigir el estudio en estos tipos de intercambiadores, por lo que en el capítulo tres se hace el diseño y construcción de un ICLF vertical y se describen las instalaciones de un ICLF horizontal y otro vertical que trabaja con salmuera geotérmica como fluido de trabajo; los dos últimos intercambiadores se encuentran operando en el campo geotérmico de Los Azufres en el estado de Michoacán, México.

El capítulo cuatro se refiere al diseño de las pruebas experimentales en el equipo experimental diseñado y se describen la secuencia de toma de datos de los otros dos intercambiadores antes mencionados.

Por último, en el capítulo cinco se mencionan los resultados obtenidos y se hace una comparación con los modelos existentes en la literatura revisada, haciendo énfasis en las ventajas y desventajas que estos modelos presentan en relación a los intercambiadores estudiados.

OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA TESIS

OBJETIVOS

Los objetivos del trabajo de tesis serán:

- Analizar las correlaciones propuestas por diversos autores para la modelación de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido.
- Diseñar y construir un ICLF vertical experimental para efectuar los estudios de hidrodinámica y transferencia de calor en los intercambiadores de calor de lecho fluidizado del tipo vertical.
- Calcular, analizar y comparar los datos obtenidos de los distintos intercambiadores, con el fin de conocer su comportamiento.

ALCANCES DE LA TESIS.

- El presente trabajo aborda la continuación del estudio de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido.
- La construcción y montaje del equipo experimental diseñado, proporcionó una infraestructura para poder continuar con estudios más avanzados de este tema.
- Los resultados experimentales contribuirán al modelado del comportamiento hidrodinámico y térmico de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido.

JUSTIFICACION DEL TRABAJO

Actualmente, nuestro país ocupa el tercer lugar a nivel mundial en lo referente a la capacidad instalada de generación de electricidad utilizando energía geotérmica. El campo geotérmico más grande de México se encuentra en Cerro Prieto, Baja California Norte, donde se desechan alrededor de 7,000 toneladas cada hora de salmuera geotérmica a una temperatura que oscila entre 90 y 150 grados Celcius, esta salmuera no es actualmente recuperable debido a los grandes problemas de incrustaciones que se tienen en los equipos convencionales (intercambiadores de calor de coraza y tubos). Al resolver dichos problemas se podrá utilizar el calor de la salmuera en diversos procesos, lo cual mejorara la eficiencia global de los sistemas de generación eléctricos que utilizan la energía geotérmica.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) ha puesto en marcha un programa que va encaminado a este fin. El Estudio de la Transferencia de Calor en los Intercambiadores de Calor de Lecho Fluidizado Líquido-Sólido. Este tipo de intercambiadores se han estado investigando desde hace 30 años en diversos países, sin llegar a conclusiones concretas al respecto, como es el comportamiento de la transferencia de calor, la geometría, la hidrodinámica, etc. En el IIE hace 5 años se empezó a investigar acerca de este tema, logrando avances satisfactorios con respecto a su hidrodinámica. Sin embargo, los estudios deben continuar para llegar a la generalización de todos los parámetros involucrados en el fenómeno de la fluidización. Para ayudar a lograr esto, la presente tesis es una contribución en el estudio del problema antes mencionado.

CAPITULO 1

" GENERALIDADES "

- a).- Introducción.
- b).- Principios básicos de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido.
- c).- Clasificación de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido.
- d).- Comparación de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado con los intercambiadores de calor convencionales.

a).- INTRODUCCION

La fluidización es la operación por medio de la cual partículas sólidas son llevadas a un estado fluido a través del contacto con un gas o líquido.

EL FENOMENO DE FLUIDIZACION

La figura 1.1 muestra el comportamiento típico de los lechos fluidizados. A una velocidad baja el fluido se infiltrará a través de los huecos del lecho, a este fenómeno se le llama "lecho fijo"; con un incremento en la velocidad, las partículas se empezaran a mover y se distinguirá una pequeña vibración en una región restringida del lecho a esto se le llamará un "lecho expandido incipiente"; en este punto la fuerza de arrastre del lecho es menor que la fuerza gravitacional teniendo como resultado que el fluido pase a través de los huecos entre las partículas. Cuando la velocidad del fluido aumenta la caída de presión dentro del lecho se incrementa también.

Al aumentar la velocidad del fluido a un punto en el cual se aplique suficiente fuerza de arrastre sobre las partículas, el lecho se expande y el sistema actúa como un fluido. Esto es llamado lecho fluidizado.

Cuando se incrementa aún más la velocidad del fluido, el lecho tiene dos fluidizaciones características. Una es la fluidización particular, en donde cada partícula actúa independientemente y el lecho se expande uniformemente sobre un rango de fluidización; y la otra es una fluidización agregativa, la cual ocurre cuando algunas partículas forman paquetes que ocasionan una recirculación tosca, provocando con esto, vacíos o burbujas dentro del lecho. Finalmente, cuando aplicamos una alta velocidad al fluido la fuerza de arrastre es tan grande que existe transporte neumático de las partículas.

Los factores que afectan las características del sistema de fluidización son en general:

- El tamaño y distribución granulométrica de sólidos
- La tendencia de los sólidos a la formación de aglomerados o su destrucción paulatina dentro del lecho
- La distribución del fluido en el lecho
- La esfericidad de los sólidos
- La geometría del lecho

Existen dos sistemas de fluidización, una es el sistema bifásico líquido-sólido y el otro es el sistema gas-sólido. El presente estudio se enfoca al sistema líquido-sólido.

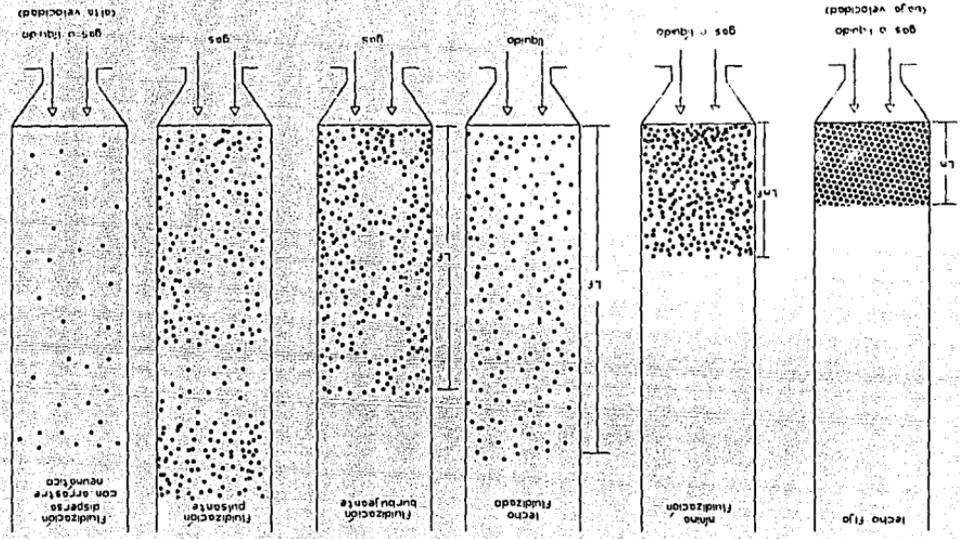


Figura 1.1 Representación esquemática de la expansión del lecho en función de la velocidad del fluido

b).- PRINCIPIOS BASICOS DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO LIQUIDO-SOLIDO

Los intercambiadores de calor de lecho fluidizado liquido-sólido (ICLF L-S) tienen buenas características para el intercambio de calor, la presencia de partículas fluidizadas aumenta la velocidad de transferencia de calor, debido al continuo movimiento que talla constantemente las superficies de intercambio de calor. Sin embargo existen propiedades que determinan el comportamiento de los lechos fluidizados.

A continuación se mencionan las más importantes de dichas propiedades:

- 1.- Un factor importante (parámetro) en los lechos fluidizados es la porosidad, la cual se define como la fracción de huecos existentes en el lecho de partículas, por lo que:

$$\epsilon = \frac{V_{\text{huecos}}}{V_{\text{total}}} = 1 - \frac{V_{\text{partículas}}}{V_{\text{total}}} \quad (1.1)$$

donde : $V_{\text{total}} = V_{\text{huecos}} + V_{\text{partículas}}$

La altura del lecho L_f y la porosidad ϵ , están en función de la densidad real y aparente de la partícula¹, definidas como:

$$L_R (1 - \epsilon_R) = L_f (1 - \epsilon) \quad (1.2)$$

$$\epsilon = 1 - (1 - \epsilon_R) (L_f / L_R) \quad (1.3)$$

$$\epsilon_R = 1 - (Q_{\text{aparente}} / Q_{\text{real}}) \quad (1.4)$$

donde:

V_{huecos} , V_{total} y $V_{\text{partículas}}$ - Volumen ocupado por los huecos, por el lecho fluidizado, y solamente por las partículas respectivamente.

ϵ - Porosidad del lecho

ϵ_R - Porosidad de las partículas en reposo

L_f - Altura del lecho fluidizado

L_R - Altura de las partículas (solas) dentro de la columna que contiene al lecho en reposo.

Q_{aparente} - Densidad aparente de las partículas

Q_{real} - Densidad real de las partículas

1.- Daizo Kunii y Octave Levenspiel, FLUIDIZATION ENGINEERING, ed. (Robert E. Krieger Publishing Company; New York, 1977) pp. 90-91.

- 2.- La fluidización ocurre cuando, la fuerza de arrastre ocasionada por el movimiento del fluido es igual al peso de las partículas, o bien la descarga de presión a través del lecho por el área transversal del tubo es igual al volumen del lecho por la fracción del sólido y por su peso específico definido como:

$$\Delta P = L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_l) (g/g_c) \quad (1.5)$$

donde: ΔP - Caída de presión del lecho fluidizado

L_{mf} - Altura del lecho para condiciones de mínima fluidización

ρ_p - Densidad real de la partícula

ρ_l - Densidad del líquido

ϵ_{mf} - Porosidad para condiciones de mínima fluidización

g - Aceleración de la gravedad 9.80 m/s^2

g_c - Constante gravitacional $9.80 [\text{kg}_m \text{ m/kg}_f \text{ s}^2]$

En la figura 1.2 se muestra la curva de caída de presión en función de la velocidad.

- 3.- La velocidad superficial es el componente vertical de la velocidad del fluido a través de la columna, asumiendo que ésta contiene solamente fluido:

$$V_o = A_t \left(\frac{1}{\rho_l} \right) \left(\frac{dM}{dt} \right) \quad (1.6)$$

donde: V_o - Velocidad superficial

A_t - Área transversal de la columna

dM - Diferencial de masa

dt - Diferencial de tiempo

- 4.- La velocidad terminal V_T , esta definida como la velocidad de una partícula sólida cayendo libremente en un fluido estacionario bajo la acción de la gravedad; la velocidad terminal puede ser expresada como:

$$V_T = \left[\frac{4 g d_p (\rho_p - \rho_l)}{3 \rho_l C_d} \right]^{1/2} \quad (1.7)$$

donde: d_p - Diámetro de partícula

C_d - Coeficiente de descarga determinado gráficamente.²

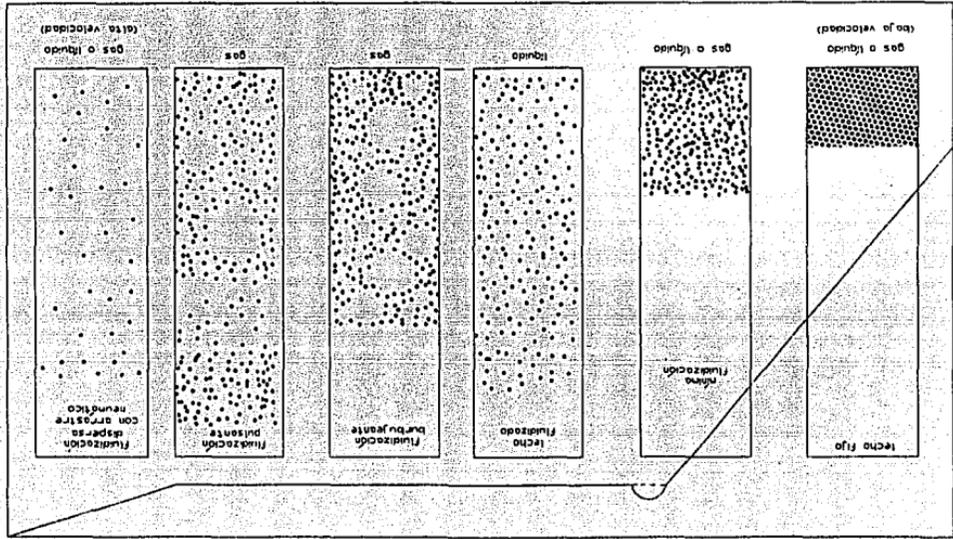


Figura 1.2 Representación de la caída de presión vs velocidad

c).-- CLASIFICACION DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO LIQUIDO-SOLIDO

Durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), la técnica de lechos fluidizados, encontró su mayor desarrollo; fué en el proceso catalítico de descomposición térmica del petróleo, donde el catalizador, debido a la descomposición en él, quedaba bloqueado, reduciendo la superficie de contacto, ocasionando con esto que los reactores de lecho empacado convencionales no cubrieran las altas demandas requeridas. La técnica de fluidización ayudó a reducir el bloqueo en los centros activos del catalizador, lo cual logró aumentar la eficiencia del proceso y cubrir así la demanda de combustible.

Desde entonces la técnica de fluidización se ha desarrollado comercialmente en las industrias químicas y petroleras, encontrando su mayor desarrollo en los sistemas gas-sólido, en los cuales se han establecido fórmulas y correlaciones que describen de una forma aproximada el comportamiento del conjunto. Este tipo de correlaciones no son aplicables a los sistemas líquido-sólido, debido a la diferencia de las variables involucradas en el proceso.

Las investigaciones a cerca del comportamiento de los sistemas líquido-sólido se han estado desarrollando en dos tipos convencionales de intercambiadores de calor, estos son los verticales y horizontales.

Intercambiadores de calor de lecho fluidizado verticales

La figura 1.3 muestra un esquema general de un intercambiador de lecho fluidizado vertical, el lecho se forma en una coraza que puede estar hecha de diversos materiales tales como acero al carbón o simplemente una columna de vidrio (este último se utiliza en los modelos experimentales), dentro de la columna se encuentra la superficie de intercambio de calor que en general es de tubo de cobre por el cual circula el fluido secundario (a menor temperatura que la del lecho). El calor es transferido del lecho fluidizado por el fluido caliente (o primario) hacia el tubo de cobre inmerso en él. Este tipo de intercambiadores presentan una buena fluidización del lecho así como altos coeficientes de transferencia de calor en comparación con los intercambiadores de calor convencionales.

Intercambiadores de calor de lecho fluidizado horizontal

La figura 1.4 muestra el arreglo horizontal de un intercambiador de calor de lecho fluidizado, se puede apreciar como el sistema esta dividido en pasos. El fluido con alta temperatura entra a la primera cámara que contiene un lecho, el

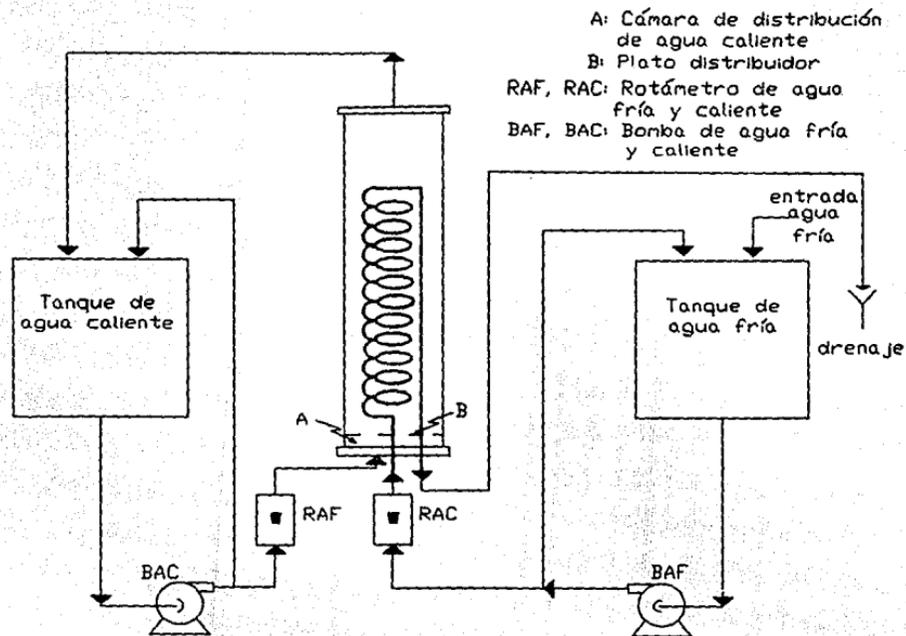


Figura 1.3 Esquema general de un intercambiador de lecho fluidizado vertical

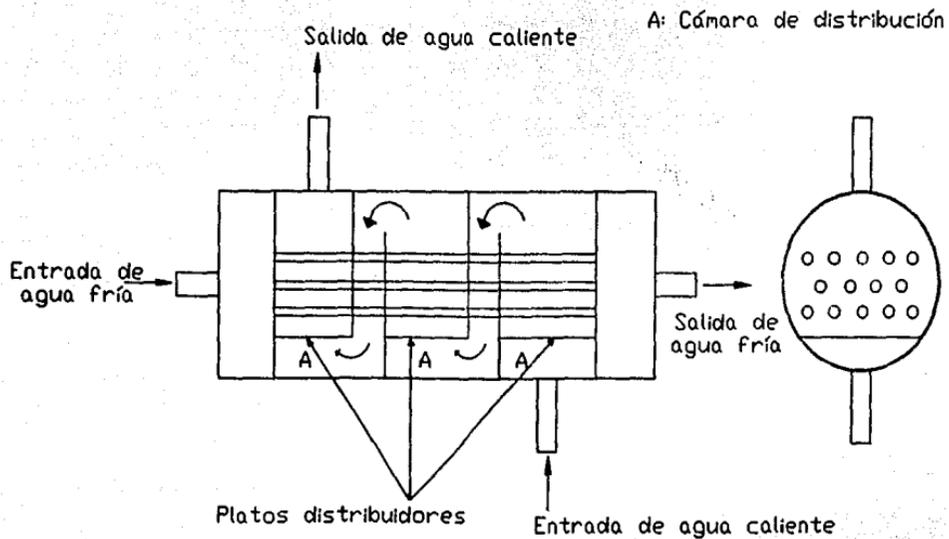


Figura 1.4 Esquema general de un intercambiador de lecho fluidizado horizontal

cual transfiere calor a una porción de la superficie de intercambio de calor, posteriormente el fluido con menos temperatura pasa a la siguiente cámara efectuando el mismo proceso; finalmente el fluido pasa a la última cámara transmitiendo el poco calor que aún haya quedado en el fluido primario. Por otro lado el fluido secundario entra a contra corriente en los tubos de cobre, saliendo por el otro extremo caliente. Los sistemas horizontales presentan una gran transferencia de calor en comparación con los verticales, sin embargo su fluidización es problemática debido a las grandes caídas de presión que existen entre las cámaras.

El propósito de presentar someramente el funcionamiento de los intercambiadores de calor verticales y horizontales es el de entender su principio de funcionamiento. En el capítulo 3 se menciona en detalle cada uno de ellos.

d).- COMPARACION DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO CON LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR CONVENCIONALES

Se han desarrollado muchos tipos de intercambiadores de calor convencionales para ser usados en varios tamaños y sofisticación tecnológica, como plantas de potencia de vapor, plantas de procesamiento químico, calefacción y acondicionamiento de aire de edificios, refrigeradores domésticos, etc. En los tipos comunes, tales como intercambiadores de coraza y tubo y los radiadores de automóvil, la transferencia de calor se realiza fundamentalmente por conducción y convección desde un fluido caliente a otro frío, tales fluidos se encuentran separados por una pared metálica.

Los intercambiadores de calor de lecho fluidizado tienen el mismo principio que los convencionales, sin embargo la presencia del lecho de partículas genera varias ventajas y desventajas en comparación con los intercambiadores de calor comunes.

VENTAJAS Y DEVENTAJAS

A continuación se mencionan las ventajas y desventajas más importantes entre los intercambiadores de calor convencionales y los de lecho fluidizado.

Ventajas

- 1.- Los intercambiadores de calor convencionales se degradan rápidamente si trabajan con fluidos incrustantes. Los de lecho fluidizado no se degradan en forma acelerada ya que el constante movimiento de las partículas talla la superficie de intercambio de calor, evitando la formación de incrustaciones.
- 2.- Los intercambiadores de calor convencionales, como ya se mencionó, transfieren calor por conducción y convección de un fluido con alta temperatura hacia otro de baja temperatura. Los de lecho fluidizado lo hacen de la misma manera pero sumando a este proceso una turbulencia del fluido caliente, lo cual origina una alta velocidad de transferencia de calor.
- 3.- La velocidad de transferencia de calor dentro de un lecho fluidizado es alta por lo que requiere superficies de intercambio de calor relativamente pequeñas y menores a la de los convencionales.
- 4.- La arena sílica (arena de mar o río) se puede usar dentro de este tipos de intercambiadores, lo cual baja el costo del lecho si se compara con otro tipo de material (por ejemplo, esferas de vidrio).
- 5.- Las velocidades de transferencia de masa y transferencia de calor, entre el fluido y las partículas son altas cuando se comparan con otras formas de contactación.

Desventajas

- 1.- La erosión dentro del recipiente y la superficie de intercambio de calor puede ser serio si no es controlada adecuadamente. Los equipos convencionales de intercambio de calor no presentan este problema.
- 2.- Los sólidos frágiles, son pulverizados y arrastrados por el fluido y las partículas dentro del lecho, lo cual origina gastos en materiales y mantenimiento.
- 3.- Existen limitantes en el flujo del fluido que esta en el lecho, debido al transporte neumático de partículas. Esta es una gran desventaja en comparación con los equipos convencionales.
- 4.- Los intercambiadores de calor comunes tienen un gran desarrollo y comercialización a nivel mundial, lo que origina que tengan más demanda que los de lecho fluidizado.
- 5.- Las correlaciones de diseño y de transferencia de calor de los equipos con lecho fluidizado son en este momento aproximadas, lo cual genera cierta incertidumbre en los diseños actuales.

Los intercambiadores de calor de lecho fluidizado no pretenden sustituir a los intercambiadores de calor convencionales, sino ofrecer una alternativa más dentro de la gran gama de aplicaciones de la industria en general, cuando se cuenta con un fluido con alto potencial incrustante.

CAPITULO 2

" REVISION BIBLIOGRAFICA "

- a).- Introducción.
- b).- Hidrodinámica.
- c).- Transferencia de calor.
- d).- Análisis bibliográfico.

a).- INTRODUCCION

La presente revisión bibliográfica abarca las publicaciones más relevantes que se han hecho en lo relacionado a los intercambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido. En estas publicaciones, diversos autores proponen algunas correlaciones que modelan los parámetros de hidrodinámica y de transferencia de calor de este tipo de intercambiadores. Sin embargo, existe mucha discrepancia en los modelos presentados y sus rangos de aplicación en la mayoría de ellos esta restringido a los intercambiadores de calor (geometría) donde se llevaron a cabo los experimentos.

El formato de la revisión es presentado con el nombre del autor y el año de la publicación como subtítulo, posteriormente se darán los parámetros más importantes que consideraron en sus experimentos y por último las correlaciones que ellos proponen. Para un mejor entendimiento de las correlaciones propuestas, se utilizará la nomenclatura de cada uno de los artículos revisados.

b).- HIDRODINAMICA

RICHARDSON Y ZAKI, (1954) ³

Ellos se enfocaron a estudiar la fluidización y sedimentación en un sistema líquido-sólido. Analizando su forma, la caída de sólidos suspendidos bajo la acción de la gravedad en un fluido estacionario y por último la fluidización de partículas bajo la acción de un fluido determinado. Las consideraciones que tomaron en cuenta son las siguientes :

Equipo experimental: Utilizaron dos columnas de Perspex, una de 6.19×10^{-2} m (2.44in) de diámetro externo por 1.82 m (6ft) de altura y la otra de 3.81×10^{-2} m (1.5in) de diámetro externo por 1.24 m (4.9ft) de altura.

Medios de fluidización: Utilizaron cloruro de sodio al 5%, alcohol etílico al 40%, glicerina al 85%, bromorfo y dibromuro de Etilo.

Partículas utilizadas: benzonato de divinil y esferas de vidrio, en un rango de $0.9 - 1.029 \times 10^{-3}$ m de diámetro.

La correlación propuesta es:

$$V_s = V_t(\epsilon)^n \quad (2.1)$$

$$\text{donde : } n = 4.65 + 19.5 \frac{D_p}{D_t} ; \quad \text{para } Re_t < 0.2 \quad (2.2)$$

3. J. F. Richardson y U. W. Zaki, "SEDIMENTATION AND FLUIDISATION : PART I" en Trans. Instn. Chem. Engers., Vol. 32, 1954, pp. 35-44.

$$n = (4.35 + 17.5 \frac{D_p}{D_t}) Re_T^{-0.3} ; \text{ para } 0.2 < Re_T < 1 \quad (2.3)$$

$$n = (4.45 + 18 \frac{D_p}{D_t}) Re_T^{-0.1} ; \text{ para } 1 < Re_T < 200 \quad (2.4)$$

$$n = (4.45) Re_T^{-0.1} ; \quad \text{para } 200 < Re_T < 500 \quad (2.5)$$

$$n = 2.39 ; \quad \text{para } Re_T > 500 \quad (2.6)$$

donde: D_p - Diámetro de la partícula [L]
 D_t - Diámetro del tubo del lecho [L]
 Re_T - Número de Reynolds con respecto a la partícula
 V_s - Velocidad superficial [LT⁻¹]
 V_t - Velocidad terminal [LT⁻¹]
 ϵ - Porosidad

Aportación: Los autores proporcionan una relación confiable por medio de la cual se puede calcular la porosidad en función de la velocidad terminal, la velocidad superficial y el exponente n (ecuación 2.1) para distintos números de Reynolds terminal.

GARSDIDE Y AL-DIBOUNI, (1977)⁴

La publicación que ellos hacen se refiere a resultados experimentales observados durante la fluidización y sedimentación de esferas de tamaños uniformes en un sistema líquido-sólido. Estos resultados se comparan con trabajos anteriores para obtener una nueva correlación, apegándose a las siguientes condiciones:

Equipo experimental: Utilizaron un columna de 5.2×10^{-2} m de diámetro interno por 1.4m de altura.

Medio de fluidización: Utilizaron como medio de fluidización agua.

Partículas utilizadas: Esferas de vidrio, en rango de 0.67 - 3.07×10^{-3} m de diámetro.

El rango del número de Reynolds fue: Entre 3.84 y 1180.

Los resultados experimentales obtenidos se presentaron en una gráfica de relación de velocidades U_p contra el número de Reynolds de la partícula Re_p , la curva obtenida se define por la ecuación:

4.- John Garside y Maan R. Al-Dibouni, "VELOCITY-VOIDAGE RELATIONSHIPS FOR FLUIDIZATION AND SEDIMENTATION IN SOLID-LIQUID SYSTEM" en Ind. Eng. Chem. Process Res. Dev., Vol. 16, No. 2, 1977, pp. 206-214.

$$\frac{U_R - E}{F - U_R} = I Re_T^n \quad (2.7)$$

donde: E y F son los valores asintóticos de U_R a bajos y altos valores de Reynolds (Re_T) respectivamente, e I y n son constantes; los valores de E y F están dados por:

$$E = \epsilon^{4.14} \quad (2.8)$$

$$F = 0.8 \epsilon^{1.28} ; \text{ para } (\epsilon < 0.85) \quad (2.9)$$

$$F = 0.8 \epsilon^{2.65} ; \text{ para } (\epsilon > 0.85) \quad (2.10)$$

El mejor valor de I encontrado para porosidades ϵ entre el rango de 0.45 a 0.95 es 0.06

La variación de n con ϵ está representada en una gráfica, donde se muestra una clara tendencia de "n" a incrementarse cuando ϵ lo hace; la mejor relación lineal encontrada entre las dos variables fué:

$$n = \epsilon + 0.02 \quad (2.11)$$

Por lo que la ecuación (2.7) queda:

$$\frac{U_R - E}{F - U_R} = 0.06 Re_T^{\epsilon+0.02} \quad (2.12)$$

Aportación: La ecuación (2.12) representa una aproximación de las características de un lecho en los sistemas líquido-sólido, esta relación es buena para los rangos de Reynolds entre 3.84 y 1180.

KMIEC, (1982) ⁵

El presenta los resultados de un estudio experimental de la expansión de un lecho fluidizado líquido-sólido. Las correlaciones obtenidas están en concordancia con las ecuaciones de Richardson-Zaki³ y Todes et al.⁵ Tomando en consideración las siguientes condiciones:

Equipo experimental: Utilizó un columna de 8.0×10^{-2} m de diámetro interno por 0.8 m de altura.

Medio de fluidización: Utilizó como medio de fluidización agua.

5.- Andrzej Kmiec, "EQUILIBRIUM OF FORCES IN A FLUIDIZED BED-EXPERIMENTAL VERIFICATION" en Chemical Engineering Journal, Vol. 23, 1982, pp.133-136.

Partículas utilizadas: Esferas de vidrio $1.18 \times 10^{-3} \text{ m}$ y $6.17 \times 10^{-3} \text{ m}$ de diámetro; partículas de intercambio iónico de $0.7 \times 10^{-3} \text{ m}$ y $1.1 \times 10^{-3} \text{ m}$ de diámetro; y esferas de Agalit de $1.94 \times 10^{-3} \text{ m}$ y $3.162 \times 10^{-3} \text{ m}$ de diámetro.

El autor propone una relación entre la fuerza aparente de arrastre y las fuerzas gravitacionales efectivas para una partícula en un lecho fluidizado, la cual es:

$$\epsilon = (FD/FG)^{0.209} \quad (2.13)$$

donde:
$$FD/FG = \frac{3 D_c Re_p^2}{4 Ar} \quad (2.14)$$

Los números adimensionales variaron entre los siguientes rangos: $12 < Re_p < 877$ y el número de Arquímedes $6.019 \times 10^3 < Ar < 3.79 \times 10^6$.

donde:
$$Ar = \frac{D_p^3 \rho_l (\rho_s - \rho_l) g}{\mu^2}$$

para: D_p - Diámetro promedio de la partícula [ft]
 ρ_s, ρ_l - Densidad particular de fluidización de los sólidos y del líquido respectivamente [lb/ft³]
 g - Aceleración de la gravedad 32.2 [ft/s²]
 μ - Viscosidad de fluidización del líquido [lb/(ft s)]

El autor calcula el coeficiente de arrastre D_c por medio de la ecuación de Schiller-Neuman:

$$D_c = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad (2.15)$$

para un rango del Reynolds de la partícula $Re_p \leq 500$, $D_c = 0.44$.

Para obtener la correlación propuesta el autor sustituye la ecuación (2.15) en (2.14) resultando:

$$\epsilon = \frac{18 (Re_p + 2.7 Re_p^{1.687})^{0.21}}{Ar^{0.21}} \quad (2.16)$$

La ecuación esta de acuerdo con la ecuación de Richardson-Zaki (2.1) en la cual la mayor desviación encontrada entre los valores experimentales y calculados fue 3.9%.

Aportación: La ecuación (2.16) proporciona una manera diferente de calcular la porosidad del lecho aunque en un rango restringido. Por otro lado confirma la aplicabilidad de la ecuación de Richardson-Zaki (2.1).

PATWARDHAN Y TIEN, (1982) ⁶

Los autores hacen un análisis y proponen una modificación a la correlación encontrada por Garside y Al-Dibouni, para predecir la relación que existe entre la velocidad-porosidad en la sedimentación y fluidización en un sistema líquido-sólido, considerando todos los números de Reynolds. El método que ellos dan es aplicable a sistemas que tengan diversas clases de partículas.

La ecuación que ellos proponen se divide en dos partes. Una se refiere al régimen de Stokes o bajos números de Reynolds, y la otra al régimen de Newton o altos valores de Reynolds:

1.- Para bajos números de Reynolds

$$U_R = \frac{\epsilon}{M} \quad (2.17)$$

$$M = \frac{\mu_{RMP}}{\mu_l} = 1 + 2.5(1-\epsilon) + 10.05(1-\epsilon)^2 + 0.00273 e^{16.6(1-\epsilon)} \quad (2.18)$$

2.- Para altos números de Reynolds

$$U_R = \left[\frac{\epsilon}{\epsilon + (1-\epsilon)R} \right]^{0.5} \quad (2.19)$$

donde: $R = \rho_p / \rho_l \quad (2.20)$

para:

μ_p, μ_l - Viscosidad de la partícula y del líquido respectivamente
 ρ_p, ρ_l - Densidad de la partícula y del líquido respectivamente

Aportación: Una de las principales ventajas que los autores encuentran en estas dos ecuaciones, es la simplicidad para relacionar la velocidad relativa entre el líquido y las partículas V_r y la

6.- V. S. Patwardhan y Chie Tien, "SEDIMENTATION AND FLUIDIZATION IN SOLID-LIQUID SYSTEMS: A SIMPLE APPROACH" en AIChE Journal, Vol. 31, No.1, 1985, pp. 146-149.

velocidad terminal de una partícula en un medio infinito U_t ; $U_t = V_t/U_t$. Por otra parte, como ya mencionamos este método se puede usar en sistemas donde se involucren diferentes tipos de partículas.

Al término de la revisión bibliográfica sobre hidrodinámica de los lecho fluidizados líquido-sólido podemos concluir lo siguiente:

- 1.- Las correlaciones propuestas están restringidas a cada caso en particular, exceptuando la de Richardson-Zaki que es la correlación más aplicada en los lecho fluidizados líquido-sólido.
- 2.- Todos los autores consideran las variables más importantes a estudiar a las propiedades termofísicas del fluido, velocidad terminal, velocidad superficial, porosidad, diámetro de partícula y sus propiedades físicas, así como las características geométricas de los intercambiadores de calor.

c).- TRANSFERENCIA DE CALOR

En el año de 1957, Wesser y Mardos en Alemania, fueron los primeros investigadores en estudiar la transferencia de calor en los sistemas líquido-sólido, encontrando un gran incremento en el coeficiente de transferencia de calor; desde entonces, la transferencia de calor en los lecho fluidizado líquido-sólido se han estudiado en varias configuraciones geométricas, en donde se utilizan diferentes rangos de velocidades y diámetros de partículas con distinta esferecidad. Sin embargo aún no se ha llegado a generalizar estas ecuaciones debido a lo complejo que resulta su análisis. A continuación se hace mención de los artículos más relevantes que se han publicado acerca de este tema.

LEMLICH Y CALDAS, (1958) ⁷

La publicación que ellos hacen se refiere a un estudio experimental de la transferencia de calor en un lecho de partículas de vidrio en una superficie determinada, apegándose a las siguientes condiciones:

Equipo experimental: Utilizaron un columna de 20.32×10^{-2} m (8in) de diámetro interno por 0.6096 m (24in) de altura y como superficie de intercambio de calor un tubo de cobre de 5.08×10^{-2} m (2in) y 0.6096 m (24in) de altura.

Medio de fluidización: Utilizaron como medios de fluidización agua.

Partículas utilizadas: Esferas de vidrio de 4.9×10^{-4} y 6.85×10^{-2} m de diámetro.

La correlación propuesta es:

$$h_{max} = 34400 (D'_p)^{0.77}; \text{ para } \epsilon = 0.75 \quad (2.21)$$

donde: h_{max} - Coeficiente de transferencia de calor máximo [Btu/(hr)(sq.ft.)(°F)]
 D'_p - Diámetro de la partícula en micras
 ϵ - Porosidad

además proponen dos correlaciones más para altas y bajas velocidades. Para velocidades bajas, con una desviación del 13% con respecto a los datos experimentales obtenidos es:

7.- Robert Lemlich E Isidoro Caldas Jr., "HEAT TRANSFER TO A LIQUID FLUIDIZED BED" en AIChE Journal, Vol. 4, No. 3, 1958, pp. 376-380.

$$\text{Nu}_p = 0.055 \text{ Re}_p \quad (2.22)$$

para altas velocidades

$$J = \text{StPr}^{2/3} = 1.4 (D_t/D_p)^{0.79} / \text{Re}_t \epsilon \quad (2.23)$$

donde: Nu_p - Nusselt de la partícula
 Re_p - Reynolds de la partícula
 J - Número de Colburn modificado
 St - Número de Stanton
 Pr - Número de Prandtl
 D_t - Diámetro del tubo
 Re_t - Reynolds del tubo

Aportación.- Los autores mencionan que el comportamiento de los lechos fluidizados se puede dividir en dos regímenes, donde el máximo coeficiente de transferencia de calor para un tamaño de partícula dado ocurre aproximadamente en la transición.

RICHARDSON Y MITSON, (1958) ⁸

El trabajo que ellos realizaron, consiste en una investigación de las propiedades de la transferencia de calor en los sistemas de lecho fluidizado con partículas esféricas uniformes de diferentes materiales, con las siguientes condiciones:

Equipo experimental: Utilizaron un columna de 5.08×10^{-2} m (21in) de diámetro interno por 1.4732m (58in) de altura.

Los medios de fluidización: Utilizaron como medios de fluidización agua y glicerina al 50%, 40% y 35%.

Partículas utilizadas: Esferas de vidrio, plomo, grava, acero y cobre en un rango de $0.46 - 4.26 \times 10^{-3}$ m de diámetro.

La correlación propuesta para concentraciones volumétricas mayores del 7% es:

$$\text{Nu} = 55 \text{ Pr}^{0.4} \left[\frac{C_p}{C_l} \right]^{0.28} \left[\frac{\rho V_t d}{\mu} \right]^M \quad (2.24)$$

8.- J.F. Richardson y A.E. Mitson, "SEDIMENTATION AND FLUIDISATION PART II-HEAT TRANSFER FROM A TUBE WALL TO A LIQUID FLUIDISED SYSTEM" en Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 36, 1958, pp. 270-282.

donde:

$$N = 0.020 \left[\frac{Q_p}{Q_l} \right] + 3.5 \quad (2.25)$$

para bajas concentraciones:

$$h_c = 14hc + h_l(1 - 14c) \quad (2.26)$$

donde:

- C_p, C_l - Calor específico de la partícula y del líquido respectivamente
- Q_p, Q_l - Densidad de la partícula y del líquido respectivamente
- v_T - Velocidad terminal
- d, μ - Diámetro de la partícula y viscosidad del líquido respectivamente
- h_c - Coeficiente de película de transferencia de calor para una concentración c
- h - Coeficiente de película de transferencia de calor para un sistema de lecho fluidizado
- h_l - Coeficiente de película de transferencia de calor para el líquido a la velocidad terminal
- c - Concentración volumétrica del sólido

Aportación: La aportación más importante de los autores es la definición de correlaciones para diferentes concentraciones volumétricas.

RICHARDSON Y SMITH, (1962) ⁹

Sus estudios se enfocaron a la medición del coeficiente de transferencia de calor y de suspensión de partículas a través de un tubo vertical, tomando una sola velocidad del fluido, con las siguientes condiciones:

Equipo experimental: Utilizaron una columna de 6.19×10^2 m (2.44in) de diámetro interno por 1.828m (6ft) de altura.

Medio de fluidización: Utilizaron como medios de fluidización agua.

Partículas utilizadas: Esferas de vidrio, plomo, grava, acero y cobre en rango de $0.25 - 1.87 \times 10^{-3}$ m de diámetro.

9.- J.F. Richardson y J.W. Smith, "HEAT TRANSFER TO LIQUID FLUIDISED SYSTEMS AND TO SUSPENSION OF COARSE PARTICLES IN VERTICAL TRANSPORT" en Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol.40, 1962, pp. 13-22.

La correlación propuesta es:

$$h - h_1 = 1095(1 + 35.4C_p^{2.12})(1 - \epsilon)^m (V_c / \epsilon)^{1.15} \quad (2.27)$$

Para: $Re_p > 100$ y $m = 0.079 Re_p^{0.36}$

donde: h, h_1 - Coeficiente de transferencia de calor de la suspensión y del líquido sin partículas respectivamente

C_p - Calor específico de la partícula

V_c - Velocidad del líquido en el sistema de lecho fluidizado sin partículas

ϵ - Porosidad

Re_p - Reynolds de la partícula

Aportación: Su correlación propone el cálculo de la transferencia de calor en función de la velocidad del fluido y la porosidad, para un flujo estable y para números de Reynolds de las partículas mayores de 100.

WASMUND Y SMITH, (1965) ¹⁰

Proponen un modelo para predecir la transferencia de calor convectiva originada por partículas de un lecho hacia una superficie, tomando en cuenta la velocidad de las partículas y su perfil radial de temperaturas. Su estudio fué hecho para dos casos:

caso I: La resistencia térmica de las partículas es menor a la película circundante a ellas. La correlación es:

$$h_c = \left[\frac{(1-\epsilon)V_c \rho_p C_p}{2} \right] \left[\frac{(e^{bc}-1)^2}{bc} \right] \quad (2.28)$$

caso II: La resistencia a la transferencia de calor en las partículas es del mismo orden que la película circundante. La correlación es:

$$h_c = \frac{(1-\epsilon) V_c \rho_p C_p T_{sp}}{2 T_w} \quad (2.29)$$

10.- B. Wasmund y J.W. Smith, "THE MECHANISM OF WALL TO FLUID HEAT TRANSFER IN PARTICULATE FLUIDIZED BED" en The Canadian Journal of Chemical Engineering, University of Toronto, Toronto, Ont., October, 1965, pp. 246-251.

donde: V_r - Velocidad de la partícula en una dirección radial
 ρ_p - Densidad de la partícula
 C_p - Calor específico de la partícula
 b_p - Espesor de la región térmica de la pared
 T_{sp} - Temperatura promedio de la partícula en una región térmica determinada
 T_w - Temperatura de la pared del lecho
 h_c - Coeficiente de transferencia de calor convectivo de la partícula.

Aportación: Los autores demuestran en su artículo que las conductividades térmicas no afectan mucho al coeficiente de transferencia de calor a porosidades mayores de 0.75 y solamente tienen un efecto significativo a porosidades menores. Su correlaciones fueron trabajadas con los datos experimentales de Richardson y Mitson⁸; para la obtención de los perfiles radiales de temperatura y con los datos de Handley¹⁰ para obtener el coeficiente de transferencia de calor de la partícula.

WASMUND Y SMITH, (1967) ¹¹

Tomando en consideración su artículo anterior (1965), hacen un estudio de la transferencia de calor de un lecho a la superficie de transferencia, encuentran que el coeficiente de transferencia de calor se incrementa con el aumento del diámetro de la partícula para una porosidad dada y concluyen que la componente convectiva en los lechos fluidizados líquidos es despreciable. Para dicho estudio tomaron las siguientes condiciones:

Equipo experimental: Utilizaron un columna de $5.227 \times 10^{-2}m$ (2.058in) de diámetro interno por 0.635m (25in) de altura.

Medio de fluidización: Utilizaron como medios de fluidización agua a una temperatura constante.

Partículas utilizadas: Esferas de vidrio, plomo, vidrio soda, aluminio y aleaciones de cobre-aluminio en rango de $0.279 - 5.689 \times 10^{-3}m$ de diámetro.

11. B. Wasmund y J.W. Smith, "WALL TO FLUID HEAT TRANSFER IN LIQUID FLUIDIZED BEDS - PART 2", en The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 45, June, 1967, pp. 156-165.

La correlación propuesta para partículas de vidrio es:

$$\frac{U \rho_f C_f}{h} = \frac{U D}{8[1.06 \times 10^{-3} \text{Re}_{p0} + 515d_p(\epsilon-0.5)]} + \frac{1}{\text{St}_w} \quad (2.30)$$

donde:
$$\frac{1}{\text{St}_w} = \frac{1}{10^{(0.11-1.75\epsilon)} \text{Re}_{p0}^{-0.33}} \quad (2.31)$$

para partículas de aluminio:

$$\frac{U \rho_f C_f}{h} = \frac{U D}{8[1.06 \times 10^{-3} \text{Re}_{p0} + 515d_p(\epsilon-0.5)]} + \frac{1}{\text{St}_w} \quad (2.32)$$

donde:
$$\frac{1}{\text{St}_w} = \frac{1}{10^{(0.27-1.75\epsilon)} \text{Re}_{p0}^{-0.37}} \quad (2.33)$$

- U - Velocidad superficial promedio
- D - Diámetro de la columna
- C_f - Calor específico del fluido
- h - Coeficiente de transferencia de calor del fluido a la pared
- ρ_f - Densidad del fluido
- Re_{p0} - Reynolds terminal
- d_p - Diámetro de la partícula
- St_w - Número de Stanton en la pared

Aportación: Los autores proporcionan correlaciones para dos distintos tipos de partículas.

TRIPHATHI Y PANDEY, (1970)¹²

Proponen un correlación de la transferencia de calor en un lecho fluidizado para distintos tipos de partícula, dicha correlación se basa en resultados experimentales con la siguientes especificaciones:

Equipo experimental: Utilizaron dos columnas concéntricas de 5.08 x 10⁻²m y 1.016 x 10⁻¹m (2 y 4in) de diámetro por 1.365m (4.479 ft) de largo.

12.- G. Tripathi y G.W. Pandey, "HEAT TRANSFER IN LIQUID FLUIDIZED BEDS" en Indian J. Technol., Vol. 8, August 1970, pp. 285-289.

Medio de fluidización: Utilizaron como medios de fluidización agua.

Partículas utilizadas: Esferas de vidrio de $4.99 \times 10^{-4} \text{m}$ y $6.58 \times 10^{-3} \text{m}$ de diámetro.

La correlación propuesta es:

$$\frac{hD_p}{k} = 0.0173 (\text{Re}_p)^{0.73} (\text{Pr})^{0.31} \left[\frac{D_p}{D_t} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right]^{-0.19} \epsilon^{1.6} \quad (2.34)$$

D_p , D_t - Diámetro de la partícula y de la columna respectivamente
 ρ_s , ρ_f - Densidad de las partículas y del fluido respectivamente
 Pr - Número de Prandtl

Aportación : Encontraron que el coeficiente de transferencia de calor se incrementa cuando la velocidad másica del fluido lo hace, y que la porosidad del lecho tiene gran influencia sobre el valor del coeficiente de transferencia de calor.

HAMILTON, (1970) ¹³

Propone un correlación para calcular la transferencia de calor basada en el factor "J" de Colburn. La correlación encontrada se apoya en la hidrodinámica del sistema y en un tratamiento algebraico del "J" modificado, las consideraciones reportadas son:

Datos experimentales: Utilizó los resultados de Wasmund y Smith ¹⁰ para probar su modelo.

La correlación propuesta es:

$$\text{Nu} = 3.38 (D / D_t)^{0.57} \text{Pr}^{1/3} \text{Re}^{0.565} [\epsilon^{0.565m} (1-\epsilon)^{0.435}] \quad (2.35)$$

donde:

Nu - Número de Nusselt de la partícula
 Re - Número de Reynolds de la partícula
 D - Diámetro de la partícula
 D_t - Diámetro del tubo
 Pr - Número de Prandtl
 ϵ - Porosidad
 m - Exponente definido por $\text{Re} = \text{Re}_0 \epsilon^m$
 Re_0 - Reynolds terminal en función de la velocidad terminal

13. William Hamilton, "A CORRELATION FOR HEAT TRANSFER IN LIQUID FLUIDIZED BEDS" en The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 48, February 1970, pp. 52-55.

Aportación: La principal aportación de esta correlación es su sencillez en el cálculo de la transferencia de calor con una buena aproximación a los valores experimentales, además involucra, como ya se ha mencionado la hidrodinámica del sistema.

BREA Y HAMILTON, (1971) ¹⁴

Proponen un modelo matemático y un mecanismo para calcular los perfiles de temperatura y las características para un máximo coeficiente de transferencia de calor en un lecho fluidizado, teniendo las siguientes especificaciones generales en su equipo experimental:

Equipo experimental: Utilizaron dos columnas concéntricas de 7.62×10^{-2} m de diámetro por 1.095 m de largo.

Los medios de fluidización: Utilizaron como medios de fluidización agua y mezclas de agua con glicerina.

Partículas utilizadas: Esferas de vidrio de 0.491 y 1.84×10^{-3} m de diámetro.

La correlación propuesta es:

$$T_f = 0.5 \left[\frac{(T_w + T_b)_1}{2} \quad \frac{(T_w + T_b)_2}{2} \right] \quad (2.36)$$

Los autores trataron su correlación de la misma manera que lo hizo Hamilton obteniendo la siguiente ecuación :

$$Nu_b = 0.943 (D / D_h)^{0.15} Pr_b^{0.52} Re_{ob}^{0.55} [\epsilon^{0.55} (1-\epsilon)^{0.45}] \quad (2.37)$$

14.- F.M. Brea y W. Hamilton, "HEAT TRANSFER IN LIQUID FLUIDISED BEDS WITH A CONCENTRIC HEATER" en Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 49, '71, pp.196-203.

donde:

- Nu_b - Número de Nusselt de la partícula
- Re_{0b} - Número de Reynolds de la partícula
- D - Diámetro de la partícula
- D_h - Diámetro hidráulico
- Pr_b - Número de Prandtl
- ϵ - Porosidad
- m - Exponente definido por $Re = Re_0 \epsilon^m$
- Re_0 - Reynolds terminal en función de la velocidad terminal
- T_f - Temperatura filmica
- T_b - Temperatura del fluido
- T_w - Temperatura de la superficie de la pared

Aportación: Los autores agregan a las ventajas encontradas por Hamilton ¹¹ que el efecto de la viscosidad sobre el coeficiente de transferencia de calor es significativo para líquidos viscosos, y poco significativo para líquidos con poca viscosidad.

RICHARDSON, ROMANI Y SHAKIRI, (1975) ¹⁵

Ellos proponen correlaciones para el cálculo de transferencia de calor basadas en el número de Reynolds terminal para un rango de porosidad dado, las especificaciones son:

Equipo experimental: Utilizaron una columna de vidrio de 1.02×10^{-1} m de diámetro, no especifican el largo.

Medio de fluidización: Utilizaron como medio de fluidización Dimetil Ftalato a 303 K.

Partículas utilizadas: Esferas de vidrio de 9.0×10^{-3} m, esferas de acero de 3×10^{-3} m de diámetro y cilindros de vidrio de $9 \times 9 \times 10^{-3}$ m.

La correlación propuesta fue basada en el Reynolds terminal, involucrando el diámetro de la partícula y la velocidad terminal, su ecuación es:

15. J.F. Richardson et al, "HEAT TRANSFER FROM IMMERSSED SURFACES IN LIQUID FLUIDISED BEDS" en Chemical Engineering Science, Vol. 31, 1976 pp. 619-624.

$$Nu = 0.067 Pr^{0.33} Re_0^{0.62} \epsilon^{0.62m-1} (1-\epsilon)^{0.36} \quad (2.38)$$

obtuvieron la siguiente expresión para obtener el máximo coeficiente de transferencia de calor:

$$h_{max} = 836.6 + 266 \log(d) \quad (2.39)$$

d - Diámetro de la partícula
 h_{max} - Máximo valor del coeficiente de transferencia de calor
 Re_0 - Número de Reynolds basado en la velocidad terminal
 ϵ - Porosidad

Aportación: Los autores proponen el cálculo de la transferencia de calor por un método diferente (ver artículo ref.15) llegando al mismo tipo de expresión - ver ecuación (2.38) - que Brea Y Hamilton - ver ecuación (2.35) y (2.37) -.

PATEL Y SIMPSON, (1976) ¹⁶

En el trabajo que ellos hicieron, se relaciona con una correlación para calcular la transferencia de calor en lechos fluidizados con dos modelos diferentes, los cuales sumados dan el coeficiente de transferencia de calor total, sus estudios los realizaron de acuerdo a:

Equipo experimental: Utilizaron una columna de 5.08×10^{-2} m de diámetro por 0.6985 m de largo.

Medio de fluidización: Utilizaron como medio de fluidización agua.

Partículas utilizadas: Esferas de vidrio de 0.414×10^{-3} m y esferas de plomo de 1.313×10^{-3} m de diámetro.

La correlación propuesta es:

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_w} + R_b \quad (2.40)$$

donde h y h_w están definidos por:

16. Rutton D. Patel y John M. Simpson, "HEAT TRANSFER IN AGGREGATIVE AND PARTICULATE LIQUID-FLUIDIZED BEDS" en Chemical Engineering Science, vol. 32, 1977, pp. 67-74.

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_{w0})} \quad (2.41)$$

$$R_b = \frac{D}{8E_r \rho C_p} \quad (2.42)$$

por lo que su ecuación final queda:

$$\frac{1}{St} = \frac{1}{St_w} + \frac{Pe_r}{8} \quad (2.43)$$

donde:

- h - Coeficiente de transferencia de calor
- R_b - Resistencia del lecho
- A - Area de la superficie de transferencia de calor
- T_w - Temperatura de la pared
- T_{w0} - Extrapolación de la temperatura en la pared
- D - Diámetro de la columna
- E_r - Difusividad radial
- ρ - Densidad del fluido
- C_p - Capacidad calorífica del fluido
- St - Número de Stanton
- St_w - Número de Stanton en la pared
- Pe_r - Número de Peclet radial

Aportación: Los autores introducen una nueva manera de calcular el coeficiente de transferencia de calor basada en dos regiones de resistencia de transferencia de calor, una dentro de una película hipotética en las cercanías de la pared y la otra dentro del lecho.

ALLEN, FUKUDA, GRIMMET Y MCATEE, (1977) ¹⁷

En el trabajo que ellos hicieron, proponen una correlación para calcular la transferencia de calor en lechos fluidizados horizontales, estudiaron la corrosión y erosión en las diversas muestras introducidas en el lecho, utilizando como medio fluidizante salmuera geotérmica, los datos obtenidos los comparan con trabajos reportados de intercambiadores de calor verticales (la comparación se hizo con los datos de Hamilton), sus principales parámetros fueron:

Equipo experimental: Utilizaron una columna horizontal de acero al carbón de 2.0×10^{-2} m de diámetro por 0.46m de largo.

17. - C.A. Allen et al, "LIQUID FLUIDIZED BED HEAT EXCHANGER - HORIZONTAL CONFIGURATION EXPERIMENTS AND DATA CORRELATIONS" en 12th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Vol. 1, Aug. 28, -Sept. 2, 1977, pp. 824-831.

Medio de fluidización:

Utilizaron como medio de fluidización salmuera geotérmica de una planta que está en el río Raft cerca de Malta, Idaho.

Partículas utilizadas: Arena de río entre 0.7 y 2.1×10^{-3} m de diámetro.

La correlación propuesta para un rango de porosidad entre 0.4 - 0.76 es:

$$Nu = 1.823 (D_p / D_c)^{0.2} Pr^{1/3} Re^{0.52} [\epsilon^{0.52m} (1-\epsilon)^{0.48}] \pm 10\% \quad (2.44)$$

y para un rango de porosidad mayor de 0.76 la ecuación es:

$$Nu = 1.85 (D_p / D_c)^{0.2} Pr^{1/3} Re^{0.52} [\epsilon^{0.48m} (1-\epsilon)^{0.52}] \pm 10\% \quad (2.45)$$

donde:

- Nu - Número de Nusselt de la partícula
- Re - Número de Reynolds terminal
- D_p - Diámetro de la partícula
- D_c - Diámetro de la columna
- Pr - Número de Prandtl
- ϵ - Porosidad
- m - Exponente definido por $Re_s = Re \epsilon^m$
- Re_s - Reynolds superficial

Aportación: Esta correlación es obtenida a partir del factor J de Chu, en la cual se especifica que el coeficiente de transferencia de calor es una función de las propiedades físicas del fluido y la porosidad; a su vez, estas propiedades tienen una estrecha relación con la velocidad y densidad de la partícula.

BACKER, ARMSTRONG Y BERGOUNOU (1978) ¹⁸

Sus estudios fueron encaminados a la transferencia de calor de lechos fluidizados en tres fases (agua, aire y partículas de vidrio). Los coeficientes de transferencia de calor fueron medidos para agua-aire, agua-partículas de vidrio, y agua-partículas de vidrio-aire, sus condiciones fueron las siguientes:

Equipo experimental: Utilizaron una columna cilíndrica de Plexiglas de 2.4×10^{-2} m de diámetro por 2.75 m de largo.

18.- C.G.J. Baker et al, "HEAT TRANSFER IN THREE-PHASE FLUIDIZED BEDS" en Powder Technology, Vol. 21, 1978, pp. 195-204.

Los medios de fluidización: Utilizaron como medios de fluidización agua y aire.

Partículas utilizadas: Esferas de vidrio entre 0.5 y 5×10^{-3} m de diámetro.

La correlación propuesta es:

$$h = 1323 U_l^{0.158} d_p^{0.168} \quad (2.46)$$

y los valores experimentales del coeficiente de transferencia de calor fueron correlacionados por:

$$\log(\text{St } \text{Re}_0^{0.33}) = -1.75 \epsilon_l + 0.11 \quad (2.47)$$

donde:

- U_l - Velocidad superficial del líquido
- h - Coeficiente de transferencia de calor
- d_p - Diámetro de la partícula
- ϵ_l - Porosidad del lecho
- St - Número de Stanton
- Re_0 - Número de Reynolds terminal

Aportación: La principal aportación es la de trabajar un lecho fluidizado con tres fases diferentes, sin embargo la investigación en este aspecto no ha sido muy desarrollada.

JOSHI (1983) ¹⁹

El autor revisa numerosos aspectos de los lechos fluidizados incluyendo la relación velocidad-porosidad en los regímenes laminar, transicional y turbulento, coeficientes de masa y calor.

Joshi hizo un análisis de los datos publicados por Richardson-Mitson, Richardson-Smith y Wasmund-Smith; de lo cuales propone una correlación para el régimen turbulento la correlación es:

$$\frac{h_y}{C_p \dot{Q}_l} = 0.18 \left[\frac{f}{2 + D_c} \right]^{0.5} \frac{V_s}{Pr^{2/3}} ; \text{para } \text{Re}_t > 500 \quad (2.48)$$

19.- J.B. Joshi, "SOLID-LIQUID FLUIDISED BEDS: SOME DESIGN ASPECTS" en Chem. Eng. Res. Des., Vol. 61, 1983, pp. 143-161.

donde: $D_c = (1.5\epsilon)^2$ (2.49)

h_w - Coeficiente de transferencia de calor en la pared del lecho
 C_p - Calor específico
 ρ_l - Densidad del líquido
 D_l - Diámetro equivalente al área del flujo del lecho
 V_s - Velocidad del fluidización intersticial
 Pr - Número de Prandtl
 f - Factor de fricción de la pared de la columna
 ϵ - Porosidad

Aportación: Los autores encuentran que en régimen turbulento ($Re_t > 500$) la presencia de sólidos incrementa la resistencia a la fluidización. En contraste con el régimen laminar ($Re_t < 0.2$) la presencia de sólidos incrementa la viscosidad de la suspensión y decrece el valor del coeficiente de transferencia de calor.

DISPENZA et al (1985) ²⁰

Los autores presentan una nueva y simple metodología para la estimación del coeficiente de transferencia de calor en lechos fluidizados líquido-sólido.

La correlación propuesta es:

$$H = H_c + H_p$$

donde: H_c es el coeficiente convectivo de la suspensión basado en las correlaciones de Dittus-Boelter para convección forzada utilizando las propiedades termofísicas de la suspensión, por lo que H_c puede representarse como:

$$H_c = (K_f/D_p) J_{sus} Re_{sus} Pr_{sus}^{-1/3} \quad (2.50)$$

$$J_{sus} = \frac{Nu_{sus}}{Re_{sus} Pr_{sus}^{1/3}} \quad (2.51)$$

H_p es el coeficiente de transferencia de calor debido a la presencia de las partículas, este coeficiente se calcula con el factor de Colburn de la partícula:

20. C. Dispenza et al, "AN IMPROVED CORRELATION TO PREDICT THE HEAT TRANSFER CONVECTIVE COEFFICIENT BETWEEN A LIQUID FLUIDIZED BED AND HEAT TRANSFER SURFACE" en VII. ATTI. del 3° Congresso Nazionale sul Trasporto del Calore, Palermo Italy, 1985, pp. A199 - A215.

$$H_p = (K_f/D_p) J_p Re_p^* Pr^{1/3} \quad (2.52)$$

donde:
$$J_p = \frac{Nu_p}{Re_p^* Pr^{1/3}} \quad (2.53)$$

Los autores encuentran una correlación muy aproximada del J_p con los datos experimentales de Wasmund-Smith y Allen et al, la cual es:

$$J_p = 0.203 - 1.75 \times 10^{-3} Re_p^* \quad (2.54)$$

donde:

- K_f - Conductividad térmica del fluido
- D_p - Diámetro de la partícula
- J_{sus}, J_p - Factor de Colburn para la suspensión y la partícula respectivamente
- Re_{sus}, Re_p^* - Número de Reynolds para la suspensión y la partícula respectivamente
- Pr, Pr_{sus} - Número de Prandtl para el fluido y la suspensión respectivamente
- Nu_{sus}, Nu_p - Número de Nusselt para la suspensión y la partícula respectivamente

Aportación: Los autores introducen una correlación muy aproximada a los datos experimentales de los autores ya mencionados, además, enfocan el estudio de la transferencia de calor de los lecho fluidizados líquido-sólido de una manera diferente a las publicaciones anteriores, la cual no depende de constantes ligadas a la geometría del sistema.

DISPENZA et al (1990) ²¹

Los autores proponen un método general simple para correlacionar la transferencia de calor en los sistemas gas-sólido y líquido-sólido, basándose en su artículo anterior [ref.20].

La correlación propuesta es:

$$H = H_c + H_p$$

H_c es el coeficiente convectivo de la suspensión tomando la sumatoria de los efectos de "la capa límite térmica" de una suspensión en particular:

21.- C. Dispenza et al, "A METHOD OF CORRELATING FLUIDIZED BED CONVECTIVE HEAT TRANSFER DATA IN HEAT TRANSFER EQUIPMENT" en Conferencia en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1990, (Cuernavaca, Morelos: 14 de agosto de 1990).

$$H_c = (K_b/X) J_b Re_b Pr_b^{1/3} \quad (2.55)$$

$$J_b = \frac{Nu_b}{Re_b Pr_b^{1/3}} \quad (2.56)$$

H_p es el coeficiente de transferencia de calor debido a la presencia de las partículas, este coeficiente se calcula con el factor de Colburn de la partícula:

$$H_p = (K_l/D_p) J_p Re_p Pr_p^{1/3} \quad (2.57)$$

$$J_p = 3.71 Re_p^{-0.875} \quad (2.58)$$

donde:

- K_l - Conductividad térmica del fluido
- K_b - Conductividad térmica del lecho
- D_p - Diámetro de la partícula
- J_b, J_p - Factor de Colburn para el lecho y la partícula respectivamente
- Re_b, Re_p - Número de Reynolds para el lecho y la partícula respectivamente
- Pr_p, Pr_b - Número de Prandtl para la partícula y el lecho respectivamente
- Nu_b, Nu_p - Número de Nusselt para el lecho y la partícula respectivamente
- X - Dimensión geométrica característica de transferencia de calor

Aportación: Los autores introducen una correlación que intenta generalizar los campos de aplicación del fenómeno de la fluidización, sin embargo, habrá que poner en práctica esta nueva correlación para comprobar su funcionalidad.

4).- ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

Al término de la revisión bibliográfica sobre la transferencia de calor de los lechos fluidizados líquido-sólido podemos concluir lo siguiente:

- 1.- Las correlaciones propuestas están restringidas a cada caso en particular, exceptuando las de Dispenza et al que son las correlaciones más generales de los artículos revisados.
- 2.- Las variables más importantes en el estudio de la transferencia de calor son: la velocidad del fluido, diámetro de la partícula, la densidad del fluido y de la partícula, los perfiles de temperatura en las cercanías de la superficie de intercambio de calor, la conductividad térmica y el calor específico tanto de la partícula como del fluido.
- 3.- El coeficiente de transferencia de calor máximo ocurre a una porosidad entre 0.7 y 0.8 [ref.7, 8, 9, 11, 12, 14, 15 y 16].
- 4.- La porosidad a la cual ocurre el coeficiente de transferencia de calor máximo decrece con el tamaño de partícula [ref. 9, 10, 11 y 13].
- 5.- El coeficiente de transferencia de calor por convección y conducción de la partícula son insignificantes [ref. 10 y 11].
- 6.- La correlación más usada para determinar la expansión del lecho es la que proponen Richardson-Zaki [ref 3]. La mayoría de los autores la usan para calcular este parámetro [ref. 9, 12, 13, 14, 15 y 17].
- 7.- La mayor parte de las correlaciones para calcular el coeficiente de transferencia de calor son de la forma:

$$Nu = A Re_t^B Pr^C \epsilon^D (1 - \epsilon)^E (d_p / d_c)^F \quad (2.59)$$

donde:

- Re_t - Reynolds terminal
- Pr - Número de Pradtl
- ϵ - Porosidad
- d_p - Diámetro de partícula
- d_c - Diámetro de la columna

y A, B, C, D, E y F son valores que cada autor ha encontrado en base a sus experimentos ²² [ref. 9, 12, 13, 14, 15 y 16].

22.- J. Siqueiros et al, "INVESTIGACION Y DESARROLLO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO LÍQUIDO-SÓLIDO EN APLICACIONES GEOTÉRMICAS" en XXX Convención Nacional del Instituto de Ingenieros Químicos 1990, tomo II, (Guadalajara, Jalisco: 7 de noviembre 1990) pp. 584-595.

- 8.- La tabla 2.1 representa los valores de las constantes de la ecuación 2.59, obtenidos por diferentes autores.

Tabla 2.1 Constantes de las variables de la ecuación 2.59

Ref.	A	B	C	D	E	F
TRIPATHI	0.0173	0.73	0.31	-1.6	0	-0.19
HAMILTON	3.38	0.565	1/3	0.565m	0.435	0.57
HAMILTON Y BREA	0.943	0.55	0.52	0.55m	0.45	0.15
RICHARDSON et al	0.67	0.62	0.33	0.62m-1	0.38	0
GRIMMET et al	1.48	0.535	1/3	0.535m	0.465	0.2
ALLEN et al	1.823	0.535	1/3	0.535m	0.465	0.2

Nota.- Tripathi incluye :
 (densidad del sólido - densidad del líquido)/(densidad del líquido)
 en la relación de d_p/d_t .

donde:

- m - Exponente definido por $Re_s = Re_t^m$
 Re_s - Reynolds superficial.

CAPITULO 3

" DISEÑO Y CONTRUCCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL "

- a).- Introducción.
- b).- Consideraciones preliminares al diseño del intercambiador de calor de lecho fluidizado vertical experimental.
- c).- Diseño del intercambiador de calor de lecho fluidizado vertical experimental.
- d).- Diseño de la instalación del intercambiador de calor de lecho fluidizado vertical experimental.
- e).- Descripción de las instalaciones de los equipos experimentales que se encuentran operando.

a).- INTRODUCCION

Habiendo estudiado los antecedentes relativos a la hidrodinámica y transferencia de calor de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado, se hace necesario plantear el diseño y construcción de equipos experimentales que permitan determinar y cuantificar el intercambio de calor en este tipo de intercambiadores.

En el presente capítulo se muestran los parámetros de diseño y construcción de un intercambiador de calor de lecho fluidizado vertical (ICLF-V), y se describen las instalaciones experimentales de un intercambiador de lecho fluidizado horizontal (ICLF-H), así como uno vertical que se encuentran operando en el campo geotérmico de Los Azufres, en el estado de Michoacán, México. Cabe resaltar que el ICLF-V que se encuentra en este campo geotérmico esta operando con salmuera geotérmica lo cual permite efectuar una comparación con los otros dos intercambiadores que trabajan con agua como fluido de trabajo.

Como primer paso se presentan las consideraciones preliminares al diseño de un ICLF-V experimental que se puso en funcionamiento en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), en la ciudad de Cuernavaca, en el estado de Morelos, México.

b).- CONSIDERACIONES PRELIMINARES AL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO VERTICAL EXPERIMENTAL.

Para establecer un camino a seguir en el diseño del equipo experimental, se hicieron las siguientes consideraciones:

- Análisis del espacio disponible para la instalación experimental, así como los servicios (tomas de agua y electricidad) necesarios para su funcionalidad.
- Inventariar los accesorios (tubos, codos, válvulas, etc.) existentes con el objeto de reducir los costos de la instalación.
- Enlistar los instrumentos de medición necesarios para el sistema.
- Cotizar con diferentes proveedores los accesorios e instrumentos faltantes.
- Checar la funcionalidad de la caldera que proporciona vapor para calentar el agua, así como su capacidad de operación.
- Con el fin de hacer más versátil el calentamiento de agua se mandaron fabricar un bloque de 4 resistencia de 10 kW, trifásicas que se instalarían dentro de los tubos que conducen al agua caliente.

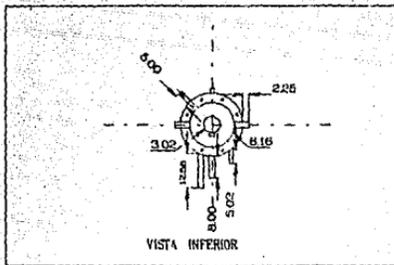
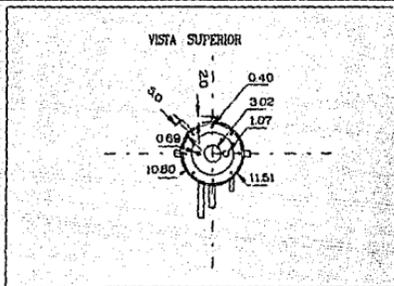
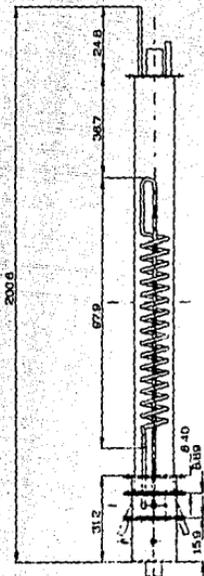
- Armar un intercambiador de calor de coraza y tubos (diseñado en el IIE) para la transferencia de calor del agua que alimenta el lecho fluidizado.
- Aprender los paquetes de cómputo (Turbo Cad, Autocad, Lotus, Wordperfect, etc.) para dibujar el diseño del intercambiador de lecho fluidizado, así como para hacer el análisis de los datos obtenidos.
- Aprender el manejo del Software y las instrucciones necesarias para el manejo del adquisitor de datos Fluke, con el cual se van a sensar las temperaturas del lecho fluidizado.
- Aprender a utilizar el soldador de termopares y checar su funcionalidad.
- Los materiales que se deben utilizar en la fabricación de las bridas que sostienen al equipo experimental, es una placa de acero al carbón de 635×10^{-3} m (1/4 in) de espesor, una columna de vidrio (para el cuerpo del intercambiador) y tubo de cobre de 1.27×10^{-2} m (1/2 in) de diámetro (para la superficie de intercambio de calor).
- La presión que maneja el intercambiador de calor de lecho fluidizado es baja (aproximadamente 1 kg/cm^2), por lo que no es un parámetro importante en la selección del material.

Una vez hechas las consideraciones anteriores y haber conocido las herramientas con las cuales se cuenta, el siguiente paso es conceptualizar el diseño del intercambiador de calor de lecho fluidizado vertical.

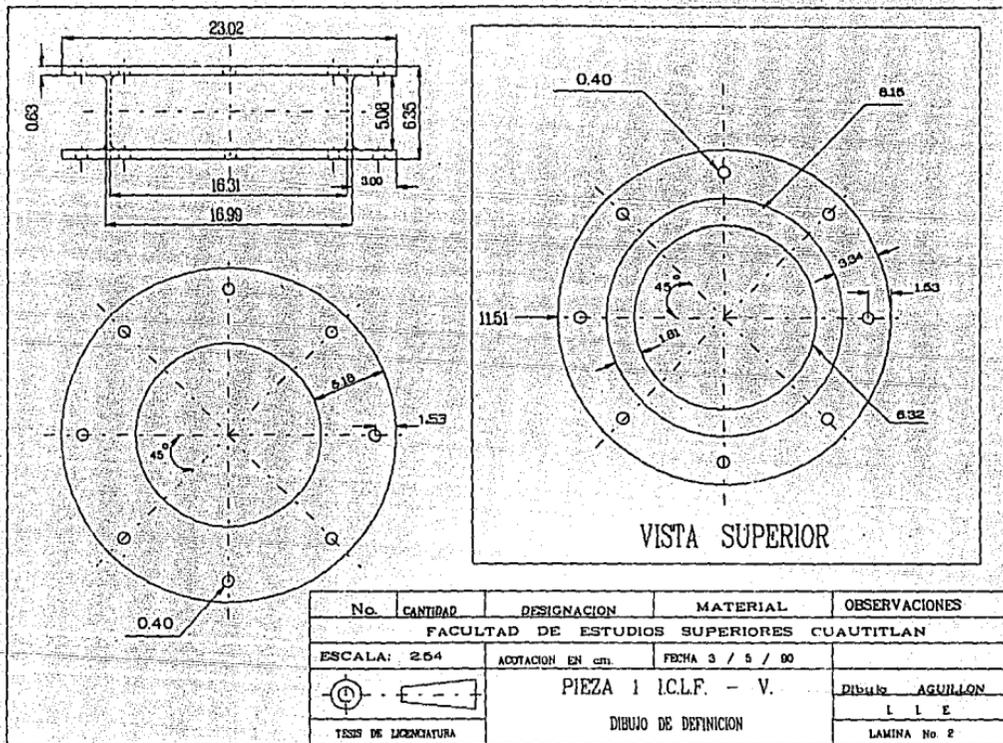
c).-- DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHE FLUIDIZADO VERTICAL EXPERIMENTAL

La coraza del intercambiador es una columna de vidrio de 0.15m de diámetro por 1.5m de altura, que se debe colocar cerca de una columna de un laboratorio cuyas dimensiones son 1.90m de ancho por 3.20m de largo y 3m de altura. Teniendo estos parámetros definidos se dibujó en un paquete de cómputo (Turbo Cad) el dibujo de conjunto del ICLF-V, la lámina 1 muestra de manera global dicho intercambiador, el cual consta de 5 piezas principales :

- 1.- La lámina 2 muestra la brida que sostiene a la columna de vidrio, que a su vez esta sostenida por las varillas empotradas en la columna de concreto del laboratorio, en esta lámina se detallan las dimensiones necesarias para su funcionamiento ergonómico.
- 2.- La lámina 3 describe en forma detallada la brida que se sujeta (por medio de tornillos de 0.004m (3/16 in)) de diámetro nominal a la brida de la lámina 1. Esta pieza



No.	CANTIDAD	DESIGNACION	MATERIAL	OBSERVACIONES
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN				
ESCALA:	1:135	ASOCIACION EN	FECHA 7/6-93	
 TITULO DE LICENCIATURA	COLUMNA DEL I.C.L.F. DIBUJO DE CONJUNTO			DIBUJO AGUILON I I E LAMINA No. 1

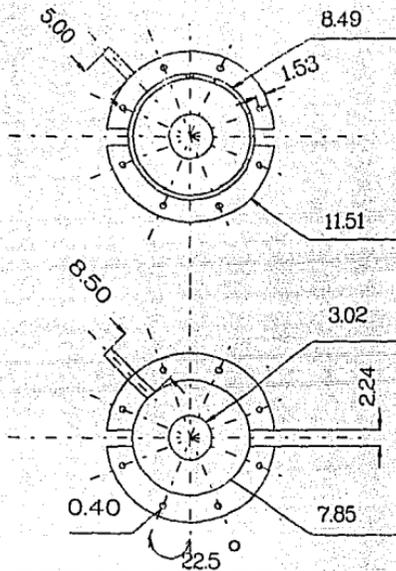
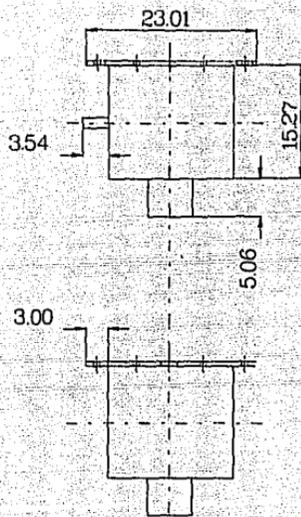


consta de dos tubos de cobre rígido de $1.27 \times 10^{-2} \text{ m}$ (1/2 in) de diámetro, en los cuales se monta el serpentín de la lámina 6. Este tubo de cobre rígido a su vez se conecta a unos tubos galvanizados de acero al carbón de $1.27 \times 10^{-2} \text{ m}$ (1/2 in) de diámetro nominal, por donde se suministra el agua fría que entra al serpentín. Además tiene en sus extremos dos tramos de tubo galvanizado de acero al carbón de $2.54 \times 10^{-2} \text{ m}$ (1 in) de diámetro nominal por donde se cambian las partículas del lecho una vez funcionando. Tiene también un tramo de tubo del mismo material que los anteriores de $0.635 \times 10^{-2} \text{ m}$ (1/4 in) de diámetro nominal, el cual se usa para sacar los termopares que sensan la temperatura dentro del lecho, y por último, en la parte de atrás de la brida (ver lámina 2) se encuentra un tubo de las mismas características que el anterior por donde se sensa la presión del lecho.

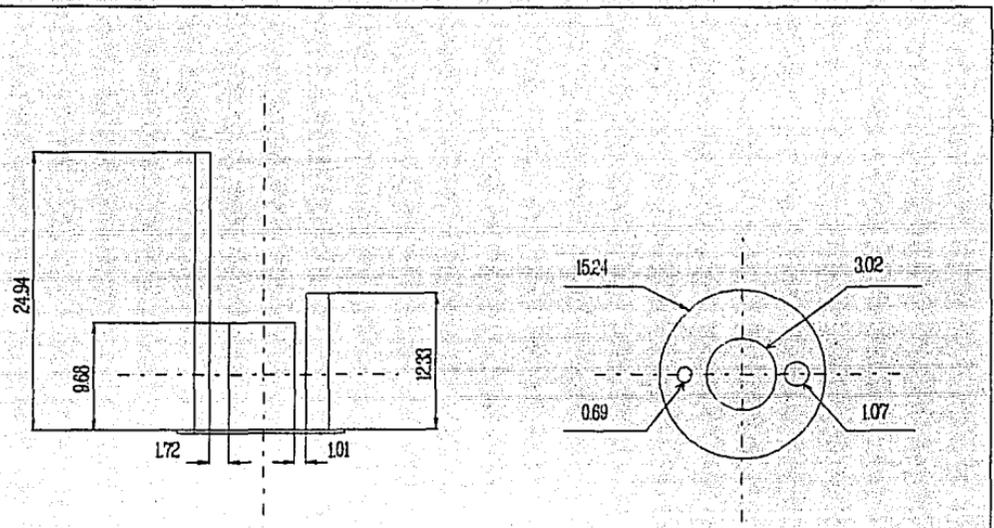
- 3.- La lámina 4 muestra la brida que distribuye el agua dentro del intercambiador de calor de lecho fluidizado, esta brida se sujeta a la pieza 2 (lámina 3) por medio de tornillos de las mismas dimensiones que los anteriores. La brida consta de un tubo de $5.08 \times 10^{-2} \text{ m}$ (2 in) de diámetro nominal soldado en la parte inferior por donde entra el agua caliente. Además esta pieza sostiene una malla de acero inoxidable con aberturas de 0.5 mm de diámetro que soportará al lecho dentro del ICLF-V.
- 4.- La lámina 5 representa a un disco que se asienta encima de la columna de vidrio y consta de tres tubos que van soldados los cuales tienen la siguiente funcionalidad: el tubo de $5.08 \times 10^{-2} \text{ m}$ (2 in) del centro (ver pieza 4) es la salida del agua caliente, el tramo de tubo de $1.09 \times 10^{-2} \text{ m}$ (3/4 in) de la derecha es para introducir la arena dentro del lecho y el tramo de la izquierda proporciona una toma de presión.
- 5.- La lámina 6 muestra en detalle la superficie de intercambio de calor del lecho, esta pieza se ensambla a la pieza de la lámina 3 y es por donde circula el agua fría, ésta pieza es hecha de 6.53 m de tubo de cobre (comercial) flexible de $1.27 \times 10^{-2} \text{ m}$ (1/2 in) de diámetro y en sus extremos consta de dos uniones (para gas) de $1.27 \times 10^{-2} \text{ m}$ (1/2 in) de diámetro que se ensamblan al tubo de cobre rígido de la pieza 2.

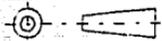
Las piezas anteriores fueron diseñadas tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

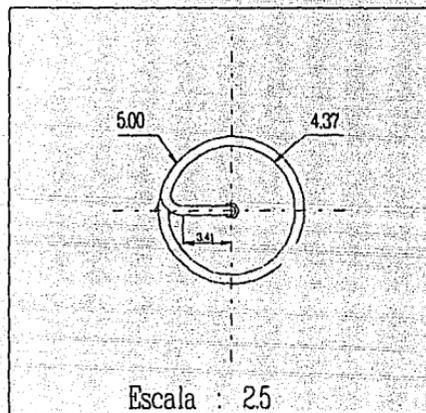
- 1.- La estructura empotrada en la columna del laboratorio ya estaba hecha, por lo que se tenía que emplear.



No.	CANTIDAD	DESIGNACION	MATERIAL	OBSERVACIONES
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN				
ESCALA: 5	ACOTACION EN cm.	FECHA: 3/5/00		
		PIEZA 3 I.C.L.F. - V. DIBUJO DE DEFINICION		Dibujó <u>AGUILON</u> I E E
TESIS DE LICENCIATURA				LAMINA No 4



No.	CANTIDAD	DESIGNACION	MATERIAL	OBSERVACIONES
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN				
ESCALA: 3:32		ACTUACION EN cm.	FECHA: 4 / 5 / 90	
 TESS DE LICENCIATURA		PIEZA 4 DIBUJO DE DEFINICION		DIBUJO AQUILLON I L E
				LAMINA No 5



No.	CANTIDAD	DESIGNACION	MATERIAL	OBSERVACIONES
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN				
ESCALA: 10		ACOTACION EN cm	FECHA: 4/9/90	
		SERPENTIN (PIEZA 5)		Dibujo AGUILON
		DIBUJO DE DEFINICION		I I E
TIENE DE LICENCIATURA				LAMINA No. 8

- 2.- La altura del laboratorio (3m) es otra limitante, lo cual origina la mediación entre longitudes de las piezas y su funcionalidad al estar operando.
- 3.- Con el fin de aprovechar la acción de la gravedad, el ingreso de las partículas que conforman el lecho se puso en la parte superior.
- 4.- La utilización de bridas es con el fin de poder desarmar el intercambiador sin mover la columna de vidrio de su lugar una vez instalada.
- 5.- Los tramos de tubo para desalojar las partículas del lecho se pusieron con una inclinación máxima para cambiarlas rápidamente.
- 6.- Los diámetros de los circuitos de agua caliente y fría se obtuvieron considerando una pequeña caída de presión.

Habiendo hecho el diseño del intercambiador de calor de lecho fluidizado, se procedió a su fabricación con los detalles que ello involucra, sin embargo una vez construido, se continuo con el diseño de la instalación del equipo experimental.

d).- DISEÑO DE LA INSTALACION DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO VERTICAL EXPERIMENTAL

El primer paso fue establecer los lineamientos a seguir en el desarrollo de los experimentos y el área disponible para colocar la instalación. Así surgió la necesidad de cuantificar los instrumentos de medición (adquisitor de datos, computadora, manómetros, etc.) y su colocación dentro del laboratorio.

En la figura 3.1 se muestra el diseño conceptualizado de la instalación así como su acotación correspondiente. En esta figura se observa que el agua caliente proveniente de un tanque (tambor de 200 litros de capacidad) TAC, pasa a la bomba de agua caliente BAC, la cual manda el fluido a un rotámetro RAC, donde hay dos válvulas para controlar el flujo; una vez que el agua pasa por el rotámetro es conducida a un intercambiador de calor convencional para que se caliente, el agua sale del intercambiador y pasa por unas resistencias eléctricas para aumentar su temperatura, después el agua caliente pasa a través de una manguera que lo conduce a la entrada del intercambiador de calor de lecho fluidizado, el agua caliente después de haber transferido parte de su calor a la superficie de intercambio de calor, sale por la parte de arriba regresando de nuevo al tanque de agua caliente, donde empieza el ciclo nuevamente.

Por otra parte el tanque de agua fría TAF (el cual tiene alimentación constante y es regulada por un sistema de flotador) envía el agua fría a una bomba, la cual pasa a través de rotámetro RAF, el agua pasa por una tubería que conecta a una manguera sujeta al intercambiador de calor de

lecho fluidizado, el agua ingresa al serpentín el cual recorre hasta que finalmente sale por una manguera al drenaje.

Las consideraciones tomadas para el diseño de la instalación fueron las siguientes:

- 1.- El arreglo de la instalación forzosamente tenía que ser hacia arriba ya que no se cuenta con espacio (superficie) suficiente, por lo que se tiene que optimizar espacio al máximo.
- 2.- La conexión del suministro de agua al intercambiador de calor de lecho fluidizado se tiene que hacer con mangueras para disminuir la vibración ocasionada por la velocidad del fluido, esta consideración es importante porque la columna de vidrio es frágil y no soporta esfuerzos de torsión.
- 3.- El arreglo vertical reduce la vibración de las tuberías ya que la estructura que soporta a los tanques y al intercambiador convencional absorbe dicha vibración en gran parte.
- 4.- Las dimensiones del tanque de agua fría fueron consideradas en función del espacio disponible.
- 5.- En la entrada del agua caliente al intercambiador de calor de lecho fluidizado, existen dos válvulas, con el objeto de poder calentar el agua cuando se inicie la operación.

En la figura 3.2 se muestra el diagrama esquematizado de la instalación del intercambiador de lecho fluidizado vertical, en ella hay alguna modificaciones al diseño conceptual y no aparece el arreglo de las resistencias, debido a que no se contó con la instalación eléctrica apropiada, sin embargo, el suministro de vapor proveniente de una caldera es suficiente para la operación del equipo.

ESPECIFICACION DE LOS EQUIPOS AUXILIARES

La instalación del intercambiador de lecho fluidizado vertical cuenta con los siguientes equipos auxiliares:

- 1.- Tanque de 200 litros (comercial)
- 2.- Intercambiador de calor convencional de coraza y tubos diseñado y fabricado en el Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- 3.- Un rotámetro con conexiones de 5.08×10^{-2} (2 in) de diámetro nominal de 36.1 galones/minuto con tubo No. F.P.-2-27-G-10/83.
- 4.- Un rotámetro con conexiones de 1.27×10^{-2} (1 in) de diámetro nominal de 3.5 galones/minuto con tubo No. F.P.-1/2-50-G-9/83.
- 5.- Una bomba trifásica de 2 hp, 220 volts, 60 Hz, factor de servicio 1.5, jaula de ardilla.

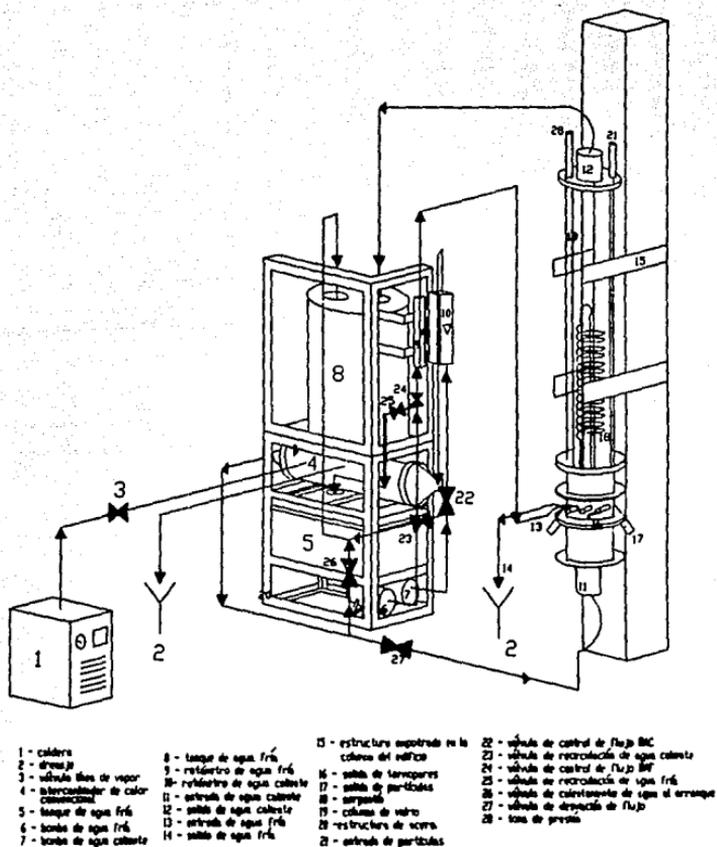


Figura 3.2 Diagrama de la instalación del ICLF-V experimental.

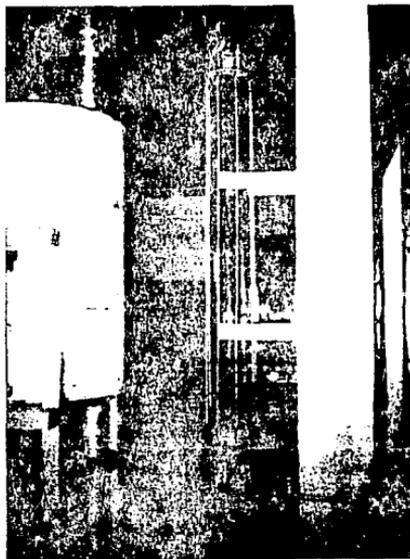


Foto 3.1 Vista general del ICLF-V experimental (septiembre 1990)

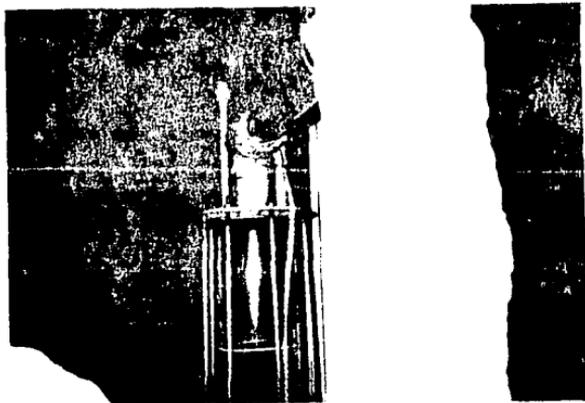


Foto 3.2 Parte superior del ICLF-V experimental

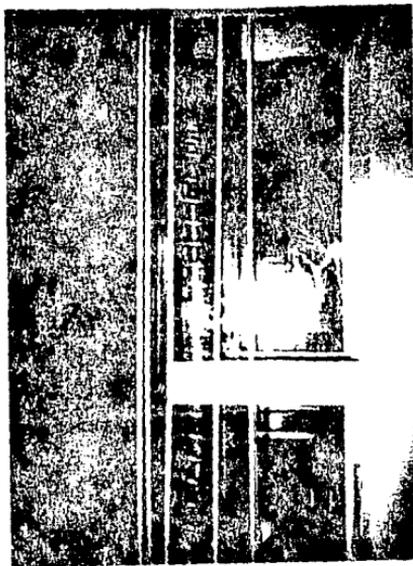


Foto 3.3 Serpentin del ICLF-V experimental

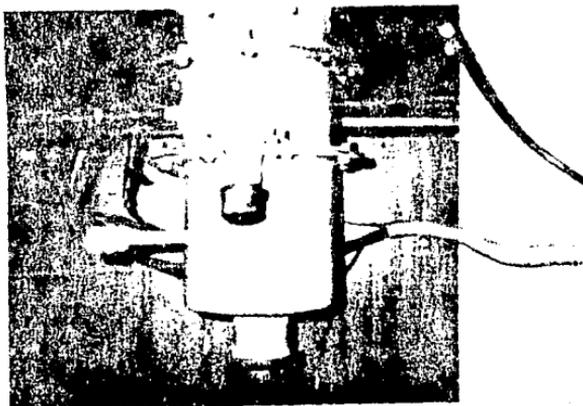


Foto 3.4 Bridas que sostienen al ICLF-V experimental

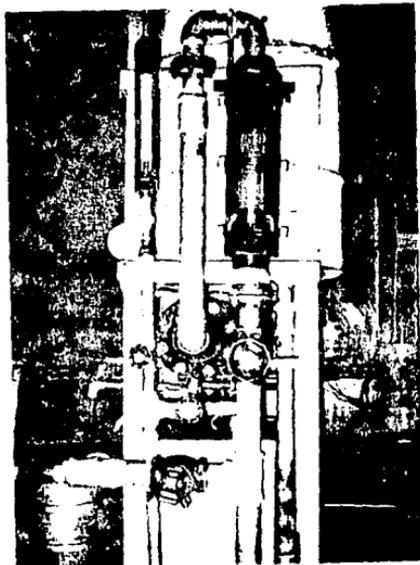


Foto 3.5 Vista general de la instalación del ICLF-V experimental

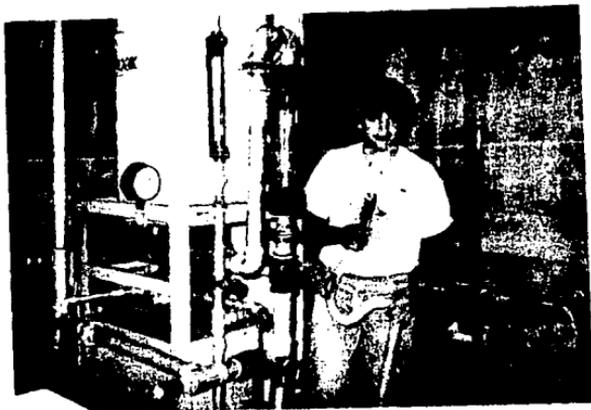


Foto 3.6 Equipos auxiliares del ICLF-V experimental

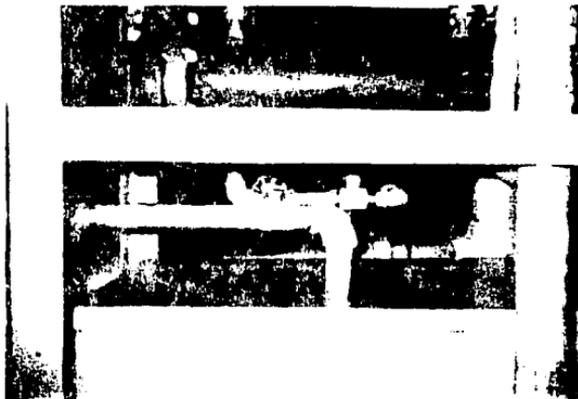


Foto 3.7 Intercambiador de calor convencional diseñado en el IIE

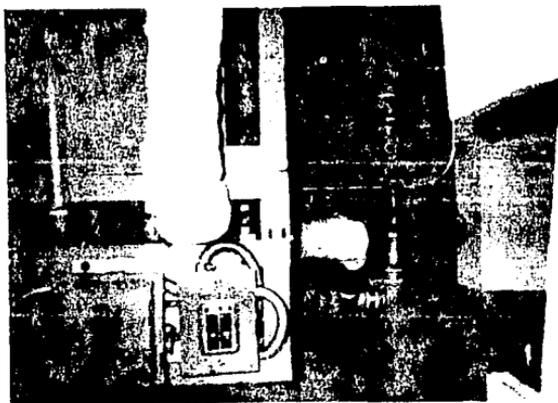


Foto 3.8 Vista inferior de la instalación y del ICLF-V experimental

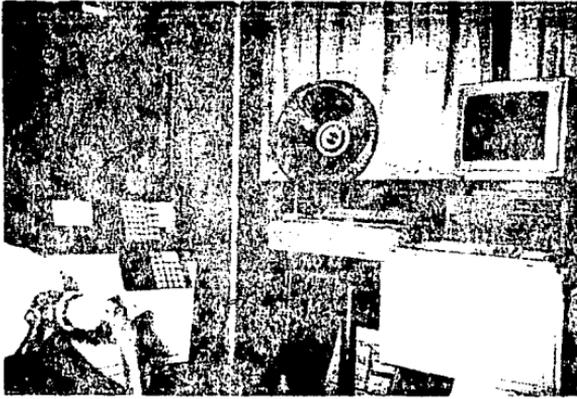


Foto 3.9 Adquisitor de datos (FLUKE) y computadora empleados en la toma de datos

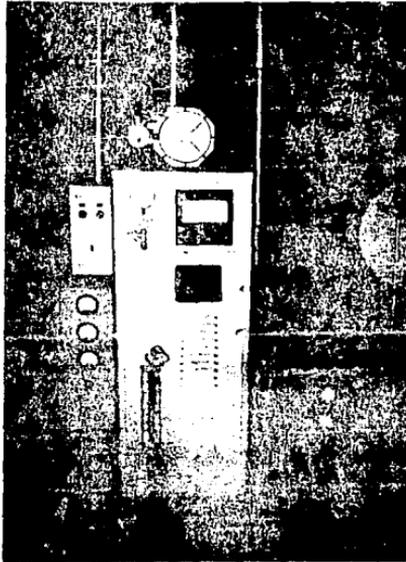


Foto 3.10 Caldera de 30 kW

- 6.- Una bomba monofásica de 0.5 hp, 127 volts, 60 Hz, jaula de ardilla.
- 7.- Una caldera de 30 kW de capacidad.
- 8.- Cable de termopar tipo T de la norma DIN, Níquel-Cromo, Costantan.
- 9.- Mangueras industriales de 1.27 x 10⁻² m (1 in) y 5.08 x 10⁻² m (2 in) de diámetro nominal.
- 10.- Un manómetro de 21 kg/cm² (300 lb/pulg²).

e.- DESCRIPCION DE LAS INSTALACIONES DE LOS EQUIPOS EXPERIMENTALES QUE SE ENCUENTRAN OPERANDO.

En el campo geotérmico de LOS AZUFRES, en el estado de Michoacán, se encuentran operando desde 1988 dos instalaciones de intercambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido horizontal (ICLF-H) y vertical (ICLF-V), este último, se encuentra operando con salmuera geotérmica proveniente de un pozo geotérmico de ese lugar. El trabajo con salmuera dificulta la operación del ICLF-V debido al manejo de salmuera la cual, debe pasar por dos separadores y luego ser regresada por una bomba hasta una laguna de evaporación, esto aunado a que el equipo está condicionado al uso que Comisión Federal de Electricidad le de a dicho pozo, da como resultado que exista poca información (experimentación) al respecto, sin embargo, los datos existentes se presentan en el capítulo 4.

Con el fin de dar una idea general de la operación de los equipos antes mencionados a continuación se describirán brevemente las instalaciones de los ICLF-H y ICLF-V que se encuentran operando en dicho lugar.

INSTALACION DEL ICLF-H.

La figura 3.3 muestra un esquema general del ICLF-H, este equipo esta compuesto por cuatro cámaras (lechos) del mismo tamaño que pueden operar de forma independiente o conectadas en serie. Las cámaras estan construidas con placas de acrílico de 1.27 x 10⁻²m (1/2 in) de espesor. Además consta de 22 tubos de cobre rígido de 1.27 x 10⁻²m (1/2 in) de diámetro nominal por 8.1 x 10⁻¹m de longitud. El arreglo de los tubos es triangular, con una distancia de centro a centro de 3.2 x 10⁻²m. Dentro del intercambiador se encuentran dos tipos de plato distribuidor, uno de ellos lo constituye una placa de aluminio de 1.6 x 10⁻¹m de ancho por 1.62 x 10⁻¹m de largo por 3.0 x 10⁻³m de espesor. Tiene 9 orificios de 6.0 x 10⁻³m de diámetro distribuidos en forma equidistante sobre la placa, en estos orificios entran nipples roscados con una capucha cónica de 4.4 x 10⁻²m de diámetro en su base por 3.0 x 10⁻²m de altura. Este tipo de plato distribuidor se encuentra solamente

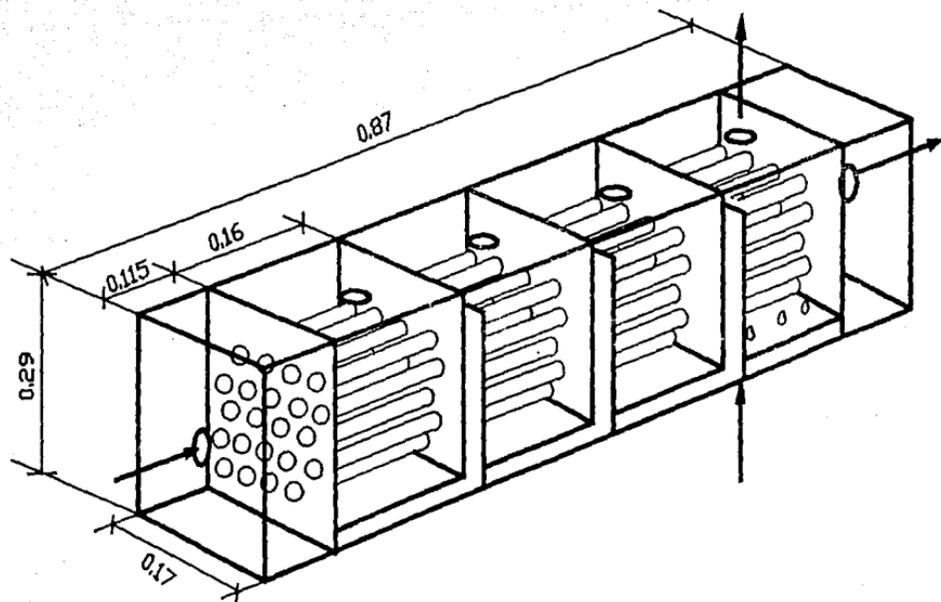


Figura 3.3 Representación general del ICLF-H

en la primera cámara. El otro tipo de plato distribuidor es una malla de acero inoxidable con aberturas de 0.5 mm. Este plato distribuidor se encuentra en las tres cámaras restantes.

La figura 3.4 presenta el esquema general de la instalación del ICLF-H: el agua caliente es tomada del tanque TAC y bombeada hacia la cámara por la bomba BAC. El control de flujo se realiza por una válvula antes de pasar por el rotámetro RAC, cuando el flujo ha atravesado el rotámetro pasa a la cámara de distribución y atraviesa el plato distribuidor ya mencionado, al salir de la primera cámara (lecho) el flujo pasa a través de las otras cámaras para que finalmente regrese al tanque de agua caliente TAC.

El agua fría que pasa a través de los tubos de cobre es tomada del tanque de agua fría TAF, y bombeada hacia el rotámetro RAF por la bomba BAF para posteriormente entrar a la cámara del intercambiador (ver figura 3.4).

INSTALACION DEL ICLF-V QUE OPERA CON SALMUERA.

La figura 3.5 muestra un esquema general del intercambiador de calor de lecho fluidizado vertical que opera con salmuera. Este equipo tiene una columna de 2.05×10^{-1} m (8in) de diámetro por 2.54 m (8.3 ft) de largo, en su interior se encuentran 3 tubos de cobre en forma de "U" invertida de 1.9×10^{-2} m (3/4 in) de diámetro nominal, cuya longitud es de 1.6m de altura. Dicho intercambiador tiene para medir la altura del lecho un sistema de flotación con una varilla que sale al exterior, esta varilla indica la posición por medio del flotador suspendido en él.

La instalación toma la salmuera proveniente de un pozo geotérmico (A22 del campo geotérmico de Los Azufres), la cual es conducida a un separador de vapor, que a su vez envía la salmuera a otro separador más pequeño con el fin de garantizar que la entrada al intercambiador sea líquido totalmente, la salmuera caliente entra al ICLF-V, una vez transferido parte de su calor la salmuera sale del intercambiador y pasa a través de un hidrociclón donde son recolectadas la partículas que se hayan arrastrado, después la salmuera pasa a un tanque graduado donde se mide el nivel y el tiempo, esto se hace con el fin de medir el flujo que pasa por el ICLF-V (no se puede poner rotámetros para medir el flujo de la salmuera por la gran cantidad de sólidos disueltos), después la salmuera es conducida a una fosa (ver figura 3.5) para luego enviarla por medio de bomba a la laguna de evaporación. El agua fría es tomada del Rio Jeraguaro y bombeada hacia el rotámetro, el cual se conecta a la entrada del serpentín del intercambiador,

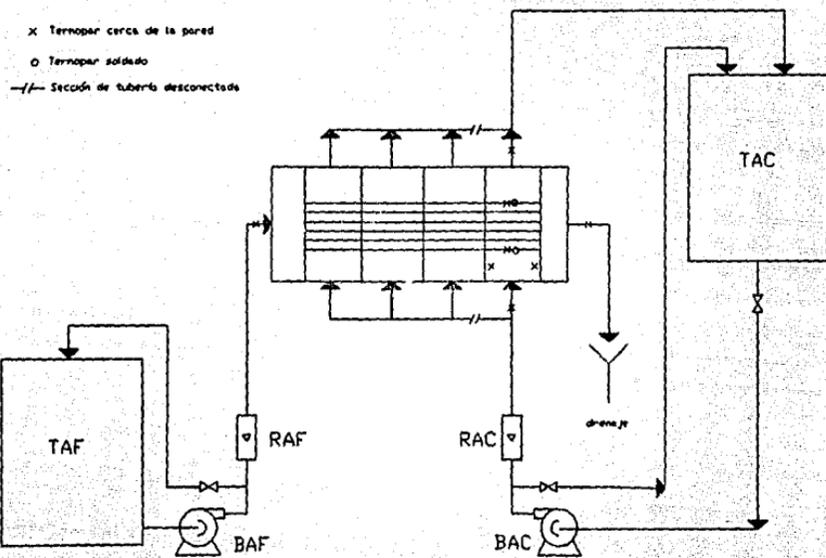


Figura 3.4 Esquema general de la instalación del ICLF-H

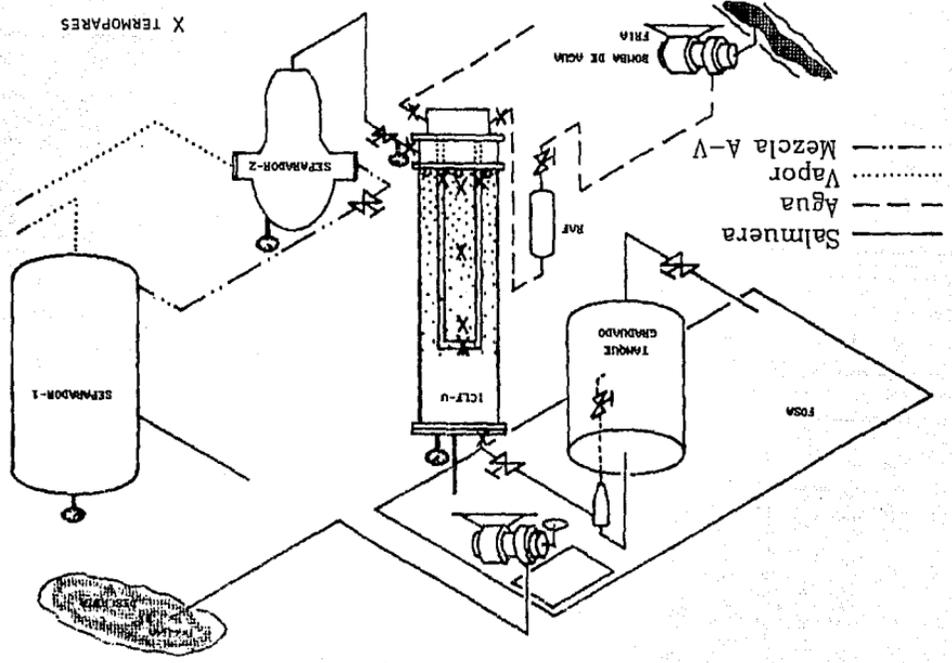


Figura 3.5 Esquema de la instalación del ICLF-V que opera con salmuera

luego el agua sale del serpentín y se envía de nuevo al río de donde se tomó originalmente.

La colocación de los termopares, al igual que el ICLF-V experimental (IIE) se ponen en 3 bloques (inferior medio y superior) para sensar las temperaturas del lecho. Otros tres termopares estan pegados a la pared de cada uno de los tres tubos de cobre; a la entrada, en medio (bloque superior) y a la salida.

CAPITULO 4

" PRUEBAS EXPERIMENTALES "

- a).- Introducción.
- b).- Diseño de pruebas experimentales.
- c).- Secuencia de operación.
- d).- Descripción de las pruebas.
- e).- Datos experimentales obtenidos.

a).- Introducción

Las pruebas experimentales en todos los intercambiadores básicamente se dividen en dos grupos: una es operar el equipo sin partículas, únicamente con el fluido de trabajo para determinar el coeficiente de transferencia de calor a distintos flujos tratando de mantener una temperatura constante (en el caso de los equipos que trabajan con agua).

La otra prueba (la más complicada) es operar el intercambiador variando la cantidad de partículas (lecho), manteniendo un flujo de agua fría, temperatura de entrada del fluido caliente y altura del lecho (L_t) constantes, con el fin de poder determinar su coeficiente de transferencia de calor en un rango determinado de operación.

El objeto de hacer dos pruebas experimentales es el de tener comparación de los coeficientes de transferencia de calor entre una y otra prueba.

b).- DISEÑO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

El primer paso fue determinar las variables más importantes (estudiadas en la literatura) que definen el comportamiento del lecho, las cuales son:

- 1.- Porosidad del lecho fluidizado: Este parámetro se define como ya se mencionó (capítulo 1, ecuación 1.1) por:

$$\epsilon = 1 - [1 - (\rho_{\text{aparente}} / \rho_{\text{real}})] [\text{masa} / (\rho_{\text{aparente}} \text{ Area } L_t)] \quad (4.1)$$

por lo que se deduce que la altura del lecho L_t , la cantidad de arena en kilogramos, el área del intercambiador y la determinación de densidades son variables que se deben medir con cuidado. La especificación de dichas variables es:

- La altura del lecho se propuso que fuera 1.3 m, ya que con esta altura el serpentín del ICLF-V se cubre completamente.
- El área se determinó a partir del diámetro de la columna vidrio (0.15 m), así que $A = 1.76715 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.
- Las densidades reales y aparentes de los 3 distintos tipos de partículas (ver tabla 4.1) se determinaron con una probeta graduada y con una balanza analítica, resultando los siguientes valores:

Tabla 4.1 Densidades de sólidos

Material	Diámetro de partícula[mm]	Densidad aparente[kg/m ³]	Densidad real[kg/m ³]
Arena	0.625	1326.3	2590.7
Arena	0.935	1310	2521
Arena	1.5	1282	2551
perlas de vidrio	1.09	1648.4	2857.1

la cantidad de arena se despejó de la ecuación 4.1 y se propuso un amplio rango de porosidades del lecho fluidizado ϵ (0.6 a 0.95). La tabla 4.2 muestra la cantidad de partículas que debe tener el lecho para obtener una porosidad determinada. Se decidió de acuerdo a lo anterior variar la cantidad de arena en cantidades de 2 kg.

- 2.- Flujo de agua caliente: Este parámetro depende de la altura del lecho L , y de la porosidad, por lo que cuando el lecho llegará a 1.3m (altura propuesta) se obtiene automáticamente este parámetro.
- 3.- Flujo de agua fría: Esta variable se propuso a 8.8316×10^{-2} litros/segundo (40% de la capacidad del RAF), con el objeto de tener una gran diferencia entre las temperaturas de entrada y salida. El valor anterior se mantuvo constante durante todos las pruebas experimentales.
- 4.- Diámetro de partícula: Se van a utilizar dos tipos de materiales para formar el lecho, arena sílica de río y perlas de vidrio. La arena fue tamizada entre dos mallas de aberturas cercanas, el diámetro de la partícula fue considerado como el promedio aritmético de la abertura de las dos mallas. La selección de los diámetros fué de 1.5 y 0.935 milímetros. Para las perlas de vidrio el fabricante proporcionó el dato de su diámetro. Estos tamaños permitiran efectuar una comparación con los resultados de la literatura.
- 5.- Colocación de termopares: La figura 4.1 muestra la colocación de los termopares en el intercambiador de calor de lecho fluidizado, se puede observar que existen tres bloques donde se sensan las temperaturas del lecho, en cada bloque hay dos termopares soldados a la pared del serpentín "S", además existen 3 termopares colocados cerca de la pared de la columna de vidrio, cerca del serpentín y en el centro de la columna de vidrio con el

Tamaño de partícula 0.935 mm (arena)
 densidad real 2521 kg/m³
 densidad aparente 1310 kg/m³

Tamaño de partícula 1.5 mm (arena)
 densidad real 2551 kg/m³
 densidad aparente 1282 kg/m³

Tamaño de partícula 1.09 mm (perlas de vidrio)
 densidad real 2857.1 kg/m³
 densidad aparente 1648.4 kg/m³

diámetro de partícula = 0.935 mm
 porosidad cantidad de arena
 (kg)

0.5	31.32
0.55	28.19
0.6	25.06
0.65	21.93
0.7	18.79
0.75	15.66
0.8	12.53
0.85	9.40
0.9	6.26
0.95	3.13
0.96	2.51
0.97	1.88
0.98	1.25
0.99	0.63

altura del lecho 1.3 m
 diámetro de la columna 0.15m
 porosidad en reposo 0.4804

diámetro de partícula = 1.5 mm
 porosidad cantidad de arena
 (kg)

0.5	29.60
0.55	26.64
0.6	23.68
0.65	20.72
0.7	17.76
0.75	14.80
0.8	11.84
0.85	8.88
0.9	5.92
0.95	2.96
0.96	2.37
0.97	1.78
0.98	1.18
0.99	0.59

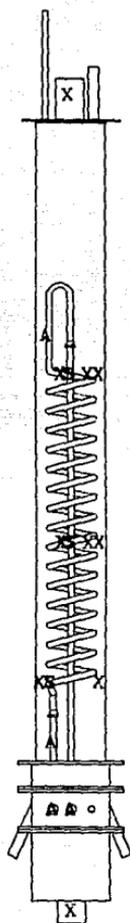
altura del lecho 1.3 m
 diámetro de la columna 0.15m
 porosidad en reposo 0.4975

diámetro de partícula = 1.09 mm
 porosidad cantidad de perlas
 (kg)

0.5	44.76
0.55	40.28
0.6	35.81
0.65	31.33
0.7	26.85
0.75	22.38
0.8	17.90
0.85	13.43
0.9	8.95
0.95	4.48
0.96	3.58
0.97	2.69
0.98	1.79
0.99	0.90

altura del lecho 1.3 m
 diámetro de la columna 0.15m
 porosidad en reposo 0.4231

TABLA 4.2 CALCULO DE LA CANTIDAD DE PARTICULAS EN FUNCION DE LA POROSIDAD



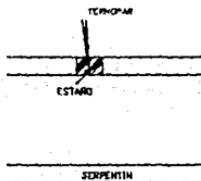
- X TERMOPAR SUSPENDIDO EN EL LECHO
- S TERMOPAR SOLDADO EN LA PARED DEL SERPENTIN
- A TERMOPAR DENTRO DEL TUBO DEL SERPENTIN

Figura 4.1 Representación de la colocación de los termopares en ICLF-V experimental

objeto de tener el perfil de temperatura horizontal y verticalmente. Por otro lado, se pusieron termopares dentro del tubo del serpentín y a la entrada y salida del agua fría como lo muestra la figura 4.1. Se colocaron también termopares a la entrada y salida del agua caliente para tener más información acerca del comportamiento del interambiador. La nomenclatura de cada termopar utilizado es definida por bloques dentro del lecho (inferior, medio y superior) y por su sitio dentro del ICLF-V, como sigue:

Termopar	Definición del sitio.
BITP	Bloque inferior termopar suspendido cerca de la columna de vidrio
BITS	Bloque inferior termopar suspendido cerca de la pared del serpentín
BITW1	Bloque inferior primer termopar soldado a la pared del serpentín
BITW2	Bloque inferior segundo termopar soldado a la pared del serpentín
BMTF	Bloque medio termopar suspendido cerca de la columna de vidrio
BMTS	Bloque medio termopar suspendido cerca de la pared del serpentín
BMTC	Bloque medio termopar suspendido en el centro de la columna de vidrio
BMTW	Bloque medio termopar soldado a la pared del serpentín
BSTP	Bloque superior termopar suspendido cerca de la columna de vidrio
BSTS	Bloque superior termopar suspendido cerca de la pared del serpentín
BSTC	Bloque superior termopar suspendido en el centro de la columna de vidrio
BSTW1	Bloque superior primer termopar soldado a la pared del serpentín
BSTW2	Bloque superior segundo termopar soldado a la pared del serpentín
TEAF	Termopar de entrada de agua fría al serpentín
TSAF	Termopar de salida de agua fría al serpentín
TEAFM	Termopar de entrada de agua fría sensada en la manguera
TSAFM	Termopar de salida de agua fría sensada en la manguera
TEAC	Termopar de entrada de agua caliente
TSAC	Termopar de salida de agua caliente
TTAC	Termopar en el tanque de agua caliente

cabe mencionar que se pusieron dos termopares soldados por cada bloque en la pared del serpentín, para tener de respaldo uno en caso que uno de ellos fallara, exceptuando el termopar localizado en el bloque de en medio por la dificultad de su soldado. El termopar localizado en el tanque de agua caliente sirve para determinar el tiempo de calentamiento cuando se arranca el equipo. La soldadura de los termopares en la pared del serpentín se hizo de la siguiente manera: se perforo el serpentín con una broca de $1.587 \times 10^{-3} \text{ m}$ (1/16 in) de diámetro nominal, posteriormente se colocó el termopar unido en sus puntas en el centro del espesor de la pared del serpentín (ver esquema de abajo), y luego se puso estaño de tal manera que la punta del termopar quedara en el centro del espesor del serpentín, esto con el objeto de que se pudiera sentir la temperatura de la pared del serpentín.



- 6.- Temperatura constante: Otro parámetro importante es la temperatura de entrada del agua caliente al ICLF-V, este dato define el comportamiento del lecho en general, su estabilidad durante todas las pruebas garantiza una mejor exactitud en el cálculo de la transferencia de calor. El control de esta variable se efectuó por medio de una válvula de globo que regula el suministro de vapor proporcionado por la caldera.

De las consideraciones anteriores se puede concluir lo siguiente: las variables que se deben mantener constantes en las pruebas experimentales son la altura del lecho L_1 , el flujo de agua fría y la temperatura de entrada del agua caliente variando únicamente la cantidad de partículas que se ponen en el lecho y el flujo de agua caliente.

c).- SECUENCIA DE OPERACION

Para llevar a cabo las pruebas se requiere efectuar una serie de pasos que permitan obtener las condiciones de operación deseadas con rapidez y exactitud, sin tener problemas con la instrumentación o bien sin someter al intercambiador de calor de lecho fluidizado vertical a altos flujos que provoquen el arrastre neumático de partículas, lo cual ocasionaría errores en la obtención de los datos.

Haciendo referencia nuevamente a la figura 3.2, la secuencia de operación en cada corrida una vez introducida la cantidad de partículas necesarias, está compuesta de los siguientes pasos:

ARRANQUE

- 1.- verificar:
 - válvula de recirculación de la bomba de agua caliente (23) este abierta, con el objeto de no suministrar demasiado flujo de agua al lecho.
 - válvula controladora de presión de vapor (3) este cerrada, para suministrar poco a poco el vapor al intercambiador de calor convencional.
 - válvula de calentamiento de agua (26) este abierta y la de desviación (27) este cerrada.
 - la caldera (1) este a la presión adecuada (120 lb/in²).
- 2.- encender la bomba de agua caliente (7) hasta marcha continua y esperara que la temperatura que sensa el termopar TAC (ver sección anterior) llegue a 80 °C.
- 3.- abrir lentamente la válvula de desviación de flujo (27) para que el agua vaya calentando las partes del intercambiador y no haya un choque drástico de temperatura.
- 4.- una vez estabilizada la temperatura, se cierra la válvula (26), enseguida se abre la válvula (27) y se procede a abrir paulatinamente la válvula de control del rotámetro de agua caliente, hasta que el lecho alcance aproximadamente la altura de 1.3m requerida.
- 5.- se efectúa el ajuste fino mediante la válvula de recirculación de agua caliente (23), teniendo cuidado en no sobrepasar demasiado la altura del lecho.

- 6.- una vez estable el equipo se ajusta el nivel del rotámetro de agua fría al 40% (8.8316×10^{-2} litros/segundo) por medio del juego alterno de las válvulas (24 y 25).
- 7.- una vez estable el equipo (manteniendo constantes los parámetros mencionados en el punto anterior), se procede a la adquisición de las temperaturas sensadas por los termopares y a medir la altura del lecho por medio de un flexómetro colocado sobre el ICLF-V.
- 8.- para agregar más partículas:
- se abre la válvula de calentamiento de agua (26) y se cierra la de desviación de flujo (27), lo cual origina que el nivel del agua dentro de la columna descienda.
 - se agregan más partículas al ICLF-V por el tramo de tubo de entrada de partículas (21).
- 9.- para continuar con otra corrida se abre y cierra las válvulas del punto anterior y se emplean a ejecutar las instrucciones a partir del punto 4.
- 10.- paro:
- cerrar la válvula de alimentación de vapor (3)
 - abrir la válvula (26) y cerrar la (27) para desviar el flujo del intercambiador.
 - abrir totalmente la válvula de regulación (23) y cerrar la (22), lo mismo debe hacerse con las válvulas (25) y (26) respectivamente.
 - apagar las bombas y la caldera.
- 11.- Se recomienda verificar después de cada cambio de tipo de partícula:
- nivel de agua del tanque de agua caliente (8).
 - el buen funcionamiento de las válvulas por si hubo arrastre neumático de partículas.
 - el mantenimiento correspondiente a la caldera.

INSTRUMENTACION

La toma de datos de las pruebas experimentales se tomaron con un adquisitor de datos serie 2280 de la marca estadounidense FLUKE, este adquisitor de datos utiliza un programa para poder comunicarse con las computadoras personales "PC" compatibles con la compañía IBM. Este programa puede:

- 1.- grabar datos sensados por los termopares del adquisitor y grabarlos a la unidad de disco de la computadora compatible con IBM.
- 2.- trasladar los archivos grabados en la unidad de disco al formato del paquete LOTUS 123.
- 3.- sensar los datos de temperatura y grabarlos a la unidad de disco casi al mismo tiempo.
- 4.- programar el adquisitor de datos para que sense un número de canales dado, en un intervalo de tiempo especificado.
- 5.- grabar los datos de programación del adquisitor en un disco y poder retornarla al adquisitor cuando así se requiera.

El adquisitor de datos FLUKE tiene actualmente 200 canales de capacidad para conectar 11 diferentes tipos de termopares, además contiene una pequeña impresora integrada y 500 kilobytes de memoria RAM para escribir nombres o especificaciones de cada canal.

El adquisitor de datos fue conectado a una computadora personal marca Olivetti modelo M380/C con 2 Megabytes de memoria RAM y monitor a color VGA. Los datos obtenidos del adquisitor de datos fueron ordenados y clasificados en el paquete comercial de computadora LOTUS 123.

d).- DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS

Antes de iniciar las corridas formales, se verificó el buen funcionamiento de los termopares y su canal correspondiente en el FLUKE, con el objeto de no tener errores de medición. Después de haber puesto a punto la instalación, se procedió a realizar el programa experimental de acuerdo a la secuencia del apartado anterior.

El ICLF-V se operó por una persona, ya que solo había que regular las válvulas de la instalación y programar al adquisitor por medio de la computadora para el registro de los datos.

La figura 4.2 muestra una impresión del archivo de registro procedente del LOTUS 123 donde se almacenaron los datos de la adquisición. La información recabada en este archivo es la mínima necesaria para describir el comportamiento del intercambiador de calor de lecho fluidizado, y se compone de:

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO VERTICAL EXPERIMENTAL

PRUEBA 1

ROTAMETRO DE AGUA FRIA 40%
 ROTAMETRO DE AGUA CALIENTE 10%
 CANTIDAD DE ARENA 0 Kg
 ALTURA DEL LECHO 0 m
 TIPO DE PARTICULA
 DIAMETRO DE PARTICULA

FECHA 12 OCT 90
 HORA 13:30:41 13:30:55 13:31:10 13:31:24 13:31:41 13:31:54 13:32:10

0 TSAC	66.8	66.3	65.8	65.5	65.3	65.8	66.3
1 TTAC	70.5	70.5	70.5	70.4	70.4	70.3	70.3
2 BITS	70.9	70.9	68.5	68.6	71.2	70.8	70.0
3 TSAF	51.4	51.8	52.0	52.1	51.9	52.0	52.3
4 BMTW	45.8	45.7	45.6	46.3	46.2	45.9	46.3
5 TEAF	32.1	32.3	32.1	32.1	32.3	32.6	32.5
6 BMTG	65.9	67.5	67.8	65.4	65.7	64.0	66.4
7 BMTS	68.1	69.8	70.8	70.4	67.0	70.2	69.5
8 BMTF	67.8	69.4	70.3	71.4	68.6	68.7	69.7
9 BSTC	64.6	64.7	63.7	65.5	65.6	65.8	65.8
10 BSTS	66.1	64.5	67.6	67.3	66.5	65.7	67.9
11 BSTP	67.1	65.5	66.9	68.5	67.4	66.7	68.4
12 BITP	71.2	71.2	74.5	73.8	72.1	74.7	72.9
13 BITW1	53.5	53.5	53.8	53.7	53.5	53.7	53.8
14 BITW2	53.6	53.9	54.5	54.3	54.1	54.2	54.3
15 BSTW1	36.2	35.2	35.3	36.3	36.5	35.4	35.3
16 BSTW2	33.8	33.7	33.7	33.9	34.7	34.2	34.2
17 TEAFM	26.3	26.3	26.4	26.3	26.3	26.4	26.3
18 TSAFM	51.8	51.7	51.5	51.4	51.1	50.8	50.4
19 TEAC	75.5	75.6	75.6	75.5	75.3	75.2	75.0

CONTINUA...

FIGURA 4.2 REPRESENTACION DE LOS DATOS DEL ICLF-V EXPERIMENTAL

CORRIDA SIN LECHO

74

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO VERTICAL EXPERIMENTAL

PRUEBA 1

ROTAMETRO DE AGUA FRIA 40%
 ROTAMETRO DE AGUA CALIENTE 10%
 CANTIDAD DE ARENA 0 Kg
 ALTURA DEL LECHO 0 m
 TIPO DE PARTICULA
 DIAMETRO DE PARTICULA

FECHA 12 OCT 9012 OCT 9012 OCT 9012 OCT 9012 OCT 9012 OCT 9012 OCT 90
 HORA 13:32:25 13:32:41 13:32:56 13:33:09 13:33:26 13:33:41 13:33:57

0	TSAC	66.2	66.3	65.8	65.6	65.7	65.7	65.1
1	TTAC	70.2	70.2	70.2	70.1	70.1	70.1	70.0
2	BITS	70.9	72.4	68.4	70.7	69.3	70.8	71.1
3	TSAF	51.9	50.4	52.4	51.6	50.6	51.3	50.4
4	BMTW	46.2	44.1	46.3	45.3	44.3	46.0	45.0
5	TEAF	32.1	32.1	32.0	32.0	31.9	31.9	31.8
6	BMTC	66.3	63.4	66.4	65.7	65.3	65.3	65.0
7	BMTS	68.8	67.6	72.5	64.5	70.4	69.7	68.8
8	BMTP	68.3	67.3	72.7	64.6	71.2	68.4	68.2
9	BSTC	64.8	63.2	65.8	63.9	63.3	64.9	64.7
10	BSTS	65.2	68.1	68.8	64.6	67.6	67.2	64.6
11	BSTP	66.2	65.9	69.7	65.7	65.5	66.2	66.3
12	BITP	71.4	71.8	68.6	72.6	71.6	73.7	71.6
13	BITW1	53.6	52.2	54.1	53.2	52.2	52.8	52.4
14	BITW2	54.3	53.1	54.2	53.7	52.8	53.6	52.6
15	BSTW1	35.6	34.6	35.6	35.5	36.6	34.6	35.0
16	BSTW2	34.6	33.6	34.2	33.8	33.7	33.8	34.3
17	TEAFM	26.4	26.4	26.4	26.4	26.4	26.4	26.4
18	TSAFM	50.2	49.5	49.7	49.7	49.1	49.2	48.8
19	TEAC	74.7	74.5	74.4	74.3	74.2	74.1	74.1

CONTINUA...

FIGURA 4.2 REPRESENTACION DE LOS DATOS DEL ICLF-V EXPERIMENTAL

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO VERTICAL EXPERIMENTAL

PRUEBA 1

ROTAMETRO DE AGUA FRIA 40%
 ROTAMETRO DE AGUA CALIENTE 10%
 CANTIDAD DE ARENA 0 kg
 ALTURA DEL LECHO 0 m
 TIPO DE PARTICULA
 DIAMETRO DE PARTICULA

FECHA	12 OCT 90	PROMEDIO					
HORA	13:34:11	13:34:25	13:34:41	13:34:56	13:35:12	13:35:27	
0 TSAC	65.3	65.1	64.7	64.9	64.9	64.7	65.6
1 TTAC	70.0	69.9	69.9	69.8	69.8	69.8	70.2
2 BITS	70.3	67.1	69.5	70.2	64.2	68.5	69.7
3 TSAF	50.4	51.3	51.1	50.3	51.2	50.5	51.3
4 BMTW	44.6	45.8	45.2	44.7	45.3	44.2	45.4
5 TEAF	32.0	32.6	32.2	31.7	32.3	31.9	32.1
6 BMTG	65.9	64.7	65.8	66.2	65.1	63.3	65.6
7 BMTS	71.4	66.8	65.2	69.3	68.8	63.5	68.7
8 BMTD	72.2	66.5	65.3	69.4	67.1	63.0	68.5
9 BSTC	63.4	64.8	63.7	64.5	63.5	61.9	64.4
10 BSTS	63.1	66.1	64.1	68.3	65.9	63.5	66.1
11 BSTP	64.1	68.0	64.9	66.6	67.2	64.2	66.6
12 BITP	71.7	68.9	71.1	71.9	67.4	71.7	71.7
13 BITW1	52.2	52.7	52.8	52.5	52.7	52.3	53.1
14 BITW2	52.4	53.4	53.1	52.6	53.4	52.7	53.5
15 BSTW1	34.3	36.4	35.9	35.6	35.6	35.0	35.5
16 BSTW2	33.6	34.1	33.6	33.6	33.5	34.1	33.9
17 TEAFM	26.4	26.4	26.4	26.5	26.4	26.4	26.4
18 TSAFM	48.6	48.8	49.0	48.4	48.8	48.4	49.8
19 TEAC	74.1	74.0	74.0	74.1	74.2	74.2	74.6

FIGURA 4.2 REPRESENTACION DE LOS DATOS DEL ICLF-V EXPERIMENTAL

- 1.- fecha y hora
- 2.- condiciones de operación: número de prueba, flujos de agua caliente y fría, altura del lecho, tipo y cantidad de partículas, y por último diámetro de partícula
- 3.- Promedio de las lecturas recabadas

nota.- Las observaciones de la inestabilidad del sistema causadas por la bomba, caldera o variación de la altura del lecho fueron registradas por separado.

Las lecturas de los rotámetros y de la altura del lecho se hicieron siempre por la misma persona, con el fin de que los datos obtenidos tuvieran un mismo criterio.

Cada corrida consiste en tomar durante 7 minutos 26 lecturas de los 20 canales de termopares, y esta operación se repite en un lapso de 30 minutos para una determinada cantidad de partículas (por ejemplo 2 kg de arena de 1.5 mm de diámetro). Cabe mencionar que el sistema debe estar estable cuando se realice la adquisición de los datos (el tiempo requerido para la estabilidad entre una y otra prueba, fue de aproximadamente 15 minutos).

Para cada tipo y diámetro de material (arena o perlas de vidrio) las corridas deben de variar 2kg de cantidad de partículas con respecto a la anterior, cubriendo los rangos especificados de porosidad (ver tabla 4.2).

PRUEBAS EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO HORIZONTAL QUE OPERA EN "LOS AZUFRES" ²³

El ICLF-H opera actualmente con una sólo cámara donde sus termopares al igual que los del ICLF-V se ponen en bloques (ver figura 3.3). La toma de los datos de temperatura se efectúa por medio de un sistema de termometría, el cual consta de un termómetro digital marca FLUKE, rastreador ("scanner" de 10 canales) y una impresora, los valores de temperatura sensados se imprimen en un rollo de papel, luego hay que teclear cada uno de los datos impresos a una computadora para poder procesar la información.

El experimento de cada tipo de material (arena o perlas de vidrio) es llamado "serie" y la variación de la cantidad de sólidos es llamada "prueba". La figura 4.3 muestra una hoja típica de registro de los datos en cada pruebas, la cual

23.- N. García y J. Siqueiros, "REPORTE INTERNO 2742/89" en Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca Morelos 1989.

PRUEBAS I C L F HHoja DE CAMPOSERIE 06 FECHA : 05 03 90DESCRIPCION DEL SOLIDO A FLUIDIZAR Arena silica de río (0.625 mm)PRUEBA No. 1

10:10 Se añadió 300 g de sólido.
10:13 Se inició recuperación de las condiciones de prueba.
11:09 Se alcanzaron las condiciones de operación.
11:31 Se estabiliza la prueba.

MASA DE SOLIDO (0.0 + 300) = 300 g
 ALTURA DEL LECHO = 18.5 cm.
 ‡ AGUA DE ENFRIAMIENTO(100‡=4.85GPM) = 15.0 ‡
 ‡ AGUA CALIENTE(100‡=36.1GPM,C/U) = 33.0 / 32.5 ‡
 PRESION DE LA CAMARA = 0.347 bar
 DIAM.DE PARTICULA SOLIDA = 0.625 mm.
 DENSIDAD REAL DE PARTICULAS = 2590.7 kg/m³

OBSERVACIONES: Se trabajó con nivel poco definido, poco arrastre de partículas fuera de la cámara, se observa alto porcentaje de partículas acumuladas en las zonas muertas, pero a pesar de todo las partículas fluidizadas se distribuyen en toda la cámara.

PRUEBA No. 2

12:00 Se añadió 300 g de sólido.
12:10 Se inició recuperación de las condiciones de prueba.
12:22 Se alcanzaron las condiciones de operación.
12:30 Se estabiliza la prueba.

MASA DE SOLIDO (300 + 300) = 600 g
 ALTURA DEL LECHO = 18.5 cm.
 ‡ AGUA DE ENFRIAMIENTO(100‡=4.85GPM) = 15.0 ‡
 ‡ AGUA CALIENTE(100‡=36.1GPM,C/U) = 30.0 / 30.0 ‡
 PRESION DE LA CAMARA = 0.379 bar
 DIAM.DE PARTICULA SOLIDA = 0.625 mm.
 DENSIDAD REAL DE PARTICULAS = 2590.7 kg/m³

OBSERVACIONES: Se observa buena distribución de las partículas fluidizadas, si hay incremento notable de partículas en las zonas muertas de la cámara, hay poca turbulencia y con nivel aún poco definido.

NOTAS: Para establecer la prueba No.1, se tardó mucho tiempo, pues se encontró en operación el separador del pozo, siendo relativamente baja la presión del cabezal, a tal grado de no fluir mezcla para calentar equipos. Se abrió parcialmente alimentación agua separada, cerrando completamente la de mezcla.

Figura 4.3 Hoja de datos del ICLF-H

contiene: número de serie, características de estabilización, cantidad del sólido, parámetros de la prueba (altura del lecho, lecturas de los rotámetros, etc.) y por último observaciones.

PRUEBAS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO VERTICAL QUE OPERA CON SALMUERA ²⁴

La figura 4.4 muestra la hoja de registros de datos del ICLF-V, en ella se muestran los parámetros requeridos para determinar la transferencia de calor del intercambiador.

La secuencia de operación es la siguiente:

- El equipo se operó por dos personas: una operando y controlando el adquisitor de datos, regulando el flujo de salmuera y midiendo la altura del lecho. La otra persona tomando el flujo de salmuera en un tanque previamente graduado por medio de la medición de la altura del nivel (del tanque) y el tiempo que tarda en alcanzar una altura determinada.
- El adquisitor de datos que tiene el ICLF-V consta de un multímetro digital marca Weston serie 6400 que proporciona los datos de temperatura en volts. Estas lecturas se tienen que leer de la pantalla del adquisitor y apuntarlas en la hoja de registro de datos (ver figura 4.4).
- El control de los flujos de salmuera y agua fría se efectuaron por medio de la alternación de válvulas, además con estas válvulas se efectuó el control (en el caso de la salmuera) de las presiones de los separadores de la mezcla salmuera vapor.
- El tipo de partícula que se estudió en el intercambiador de calor fue únicamente arena de 0.635 mm de diámetro.

e).- DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

En el anexo 1, 2 y 3 se presentan un resumen de las corridas más representativas de los datos obtenidos experimentalmente en los sistemas de lecho fluidizado vertical y horizontal.

24.- Peralta Javier, "Estudio sobre remoción de sílice por medio de lechos fluidizados." (tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, (en impreta).

HOJA DE DATOS

Estudios sobre Remoción de Sílice
Por medio de lechos fluidizados



79

Experimento No. _____ Tamaño de partículas _____ mm

Fecha _____
de mes año

Firma _____

NORA				
Altura LECHO				
Tiempo SEPARADOR				
Flujo AGUA FRIA				
Flujo SALMUERA				
T \odot ENTRADA				
T \odot SALIDA				
T \odot ABAJO				
T \odot ENMEDIO				
T \odot ARRIBA				
T \odot ABAJO				
T \odot ENMEDIO				
T \odot ARRIBA				
Temps ENTRADA				
Temps SALIDA				
Presión SEPARADOR				
Presión SALIDA				
Presión ENTRADA				
Conc. ENTRADA				
Conc. SALIDA				
Conc. SEPARADOR				
Temp. MUESTREO				

OBSERVACIONES _____

Figura 4.4 Hoja de toma de datos del ICLF-V que opera con salmuera.

En la foto 4.1 se muestra el lecho fluidizado con 8 kg de arena sílica de 0.935 mm de diámetro, el flujo de agua fría es de 8.8316×10^{-2} litros/segundo y el flujo de agua caliente es de 1.8902 litros/segundo. Se observa en esta foto que la parte superior del lecho es pulsante por lo que es difícil determinar con precisión la porosidad del mismo (o sea medir la altura del lecho).

En la foto 4.2 se muestra un lecho fluidizado con 16 kg de arena sílica de 0.935 mm de diámetro, el flujo de agua fría es de 8.8316×10^{-2} litros/segundo y el flujo de agua caliente es de 1.2981 litros/segundo. Se observa en esta foto que la parte superior del lecho es estable por lo que la porosidad del mismo se define con buena precisión.

En el capítulo siguiente se describe ampliamente el manejo de la información obtenida, la manera en que se analiza y los resultados a que conduce este trabajo.

Foto 4.1 Lecho pulsante (8 kg de arena)

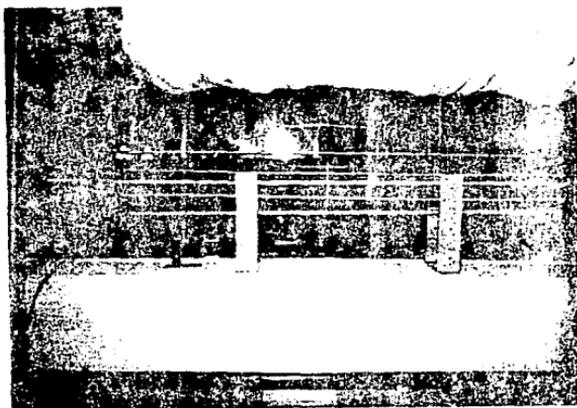
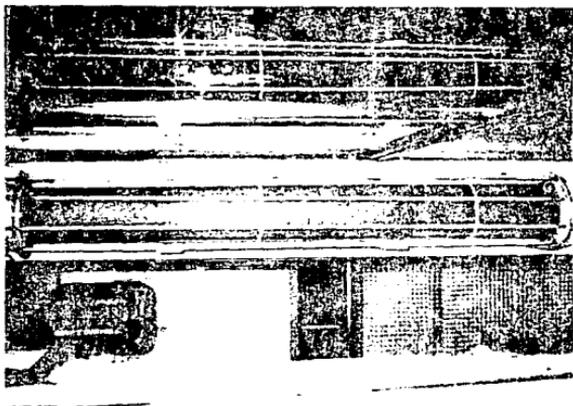


Foto 4.2 Lecho estable (16 kg de arena)



CAPITULO 5

" RESULTADOS "

- a).- Introducción.
- b).- Resultados de pruebas sin partículas.
- c).- Resultados de pruebas con partículas.
- d).- Comparación de los resultados experimentales con los modelos existentes en la literatura.

a).- INTRODUCCION

El capítulo de resultados presenta el análisis de los tres tipos de intercambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido descritos en los apartados anteriores, dicho análisis parte por definir las fórmulas empleadas para la transferencia de calor y la expansión del lecho en las pruebas efectuadas sin lecho y con lecho para cada intercambiador de calor.

Los datos se analizan en la hoja de cálculo LOTUS 123, por la versatilidad y fácil operación del paquete, esto representa una ventaja, ya que la información (datos de temperaturas) procesada rebasa la cifra de 145 000, (aproximadamente 135 000 para ICLF-V experimental, 10 mil para ICLF-H y 500 para ICLF-V que opera con salmuera), cabe mencionar que los datos obtenidos del ICLF-V (salmuera) son pocos porque el equipo aún se encuentra en etapa de pruebas operacionales. Además que su operación depende del suministro de salmuera que permita la coordinadora del campo geotérmico de los Azufres Michoacán. El procedimiento a seguir en el análisis de los datos es el siguiente:

- 1.- Los resultados obtenidos se procesaron con los promedios aritméticos resultantes de cada prueba realizada.
- 2.- Las propiedades físicas del agua (densidad, viscosidad, entalpia, número de Prandtl, capacidad calorífica y conductividad térmica) se calculan por medio de regresiones polinomiales, las cuales facilitan el manejo de la información.
- 3.- Una vez obtenidos los resultados, se procede a graficarlos para su representación.

Con el objeto de tener un marco de referencia, los resultados calculados se comparan con los modelos existentes en la literatura.

La nomenclatura empleada en las fórmulas y correlaciones en este capítulo se encuentra al principio de este trabajo.

b) RESULTADOS DE PRUEBAS SIN PARTICULAS

Como primer paso se define la ecuación publicada por Colburn en 1933, en donde reporta un método general para correlacionar los datos de transferencia de calor por convección forzada para distintos sistemas de transferencia de calor:

$$J = \frac{Nu}{Re Pr^{1/3}} = C (Re)^A \quad (5.1)$$

donde :

$$Nu = hD_c/K \quad (5.2)$$

$$h = \frac{Q}{A_r LMTD} \quad (5.3)$$

$$Q = G \Delta H \quad (5.4)$$

$$Re = \frac{V D_c \rho}{\mu} \quad (5.5)$$

$$V = G/(A_c \rho) \quad (5.6)$$

La figura 5.1 muestra la gráfica de $\ln J$ (Colburn) contra $\ln Re$ para el ICLF-V, en esta figura se observa una buena aproximación a una línea recta de los resultados experimentales, por lo que de la ecuación (5.1) se deduce:

$$J = 1.5477 Re^{-0.5036} \quad (5.7)$$

Por otro lado, la gráfica de la figura 5.2 describe los resultados obtenidos en el ICLF-H, la ecuación que resulta es:

$$J = 2.2997 Re^{-0.42054} \quad (5.8)$$

cabe mencionar que se calcula el diámetro hidráulico del ICLF-H (ya que la sección del intercambiador es cuadrada) para obtener los números adimensionales descritos anteriormente.

Para el caso del intercambiador de calor de lecho fluidizado vertical que trabaja con salmuera, no existen datos relevantes de corridas sin lecho, por lo que sólo nos limitaremos en mencionarlo en la parte de corridas con lecho.

En la gráfica de la figura 5.3 se muestran los datos experimentales del ICLF-V y el ICLF-H, en ella se observan el defasamiento de las curvas ocasionado por la relativa diferencia de sus pendientes. Haciendo un análisis comparativo de esta figura podremos deducir lo siguiente:

- Los rangos de número de Reynolds del ICLF-V y del ICLF-H al trabajar sin partículas, son cercanos.

CALCULO SIN ARENA ICLF-V exp.

$$m = -0.6036, b = 1.5477$$

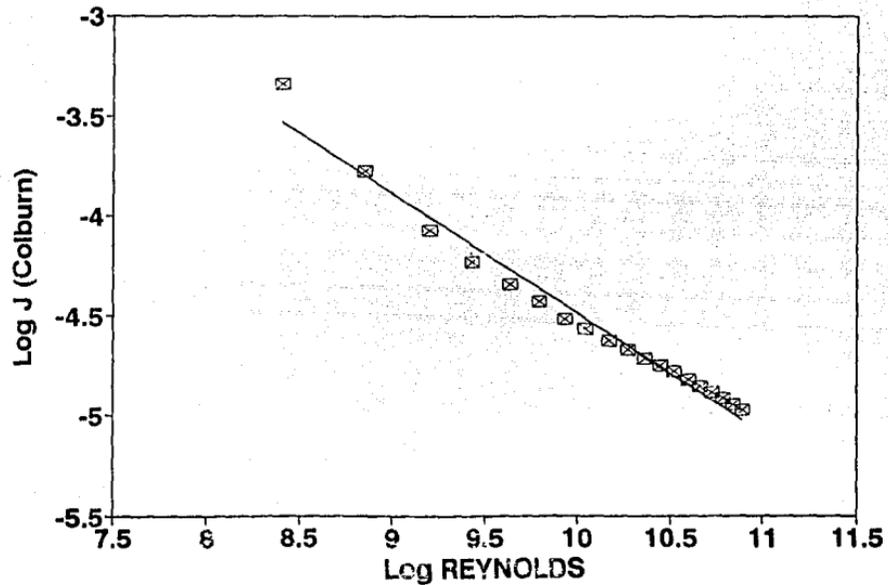


Figura 5.1 Log Reynolds vs Log J (Colburn)

CALCULO SIN ARENA ICLF-H

$$m = -0.42054, b = 2.299792$$

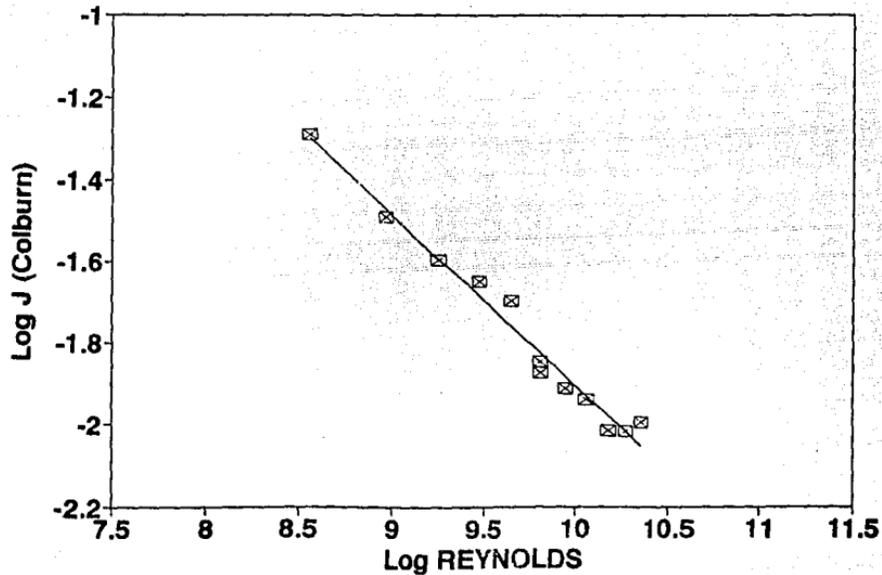


Figura 5.2 Log Reynolds vs Log J (Colburn)

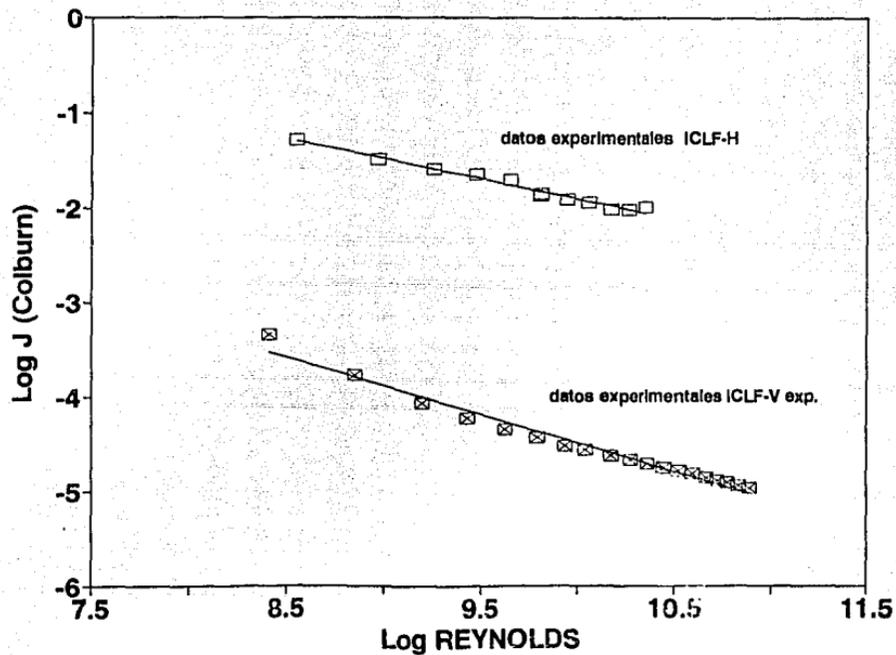


Figura 5.3 Log Reynolds vs Log J (Colburn)

- .. Los valores de las pendientes y ordenadas al origen de las líneas proporcionan una herramienta muy útil para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor.

c).- RESULTADOS DE PRUEBAS CON PARTICULAS

La presente sección se divide en dos partes : una es la descripción de los resultados obtenidos en la expansión del lecho y la otra es la transferencia de calor.

EXPANSION DEL LECHO

La porosidad del lecho fluidizado ϵ , se representa como ya se ha mencionado (ecuación 4.1) por:

$$\epsilon = 1 - [(1 - Q_{\text{aparente}}/Q_{\text{real}})(\text{masa}/(Q_{\text{aparente}} A_c L_t))] \quad (5.9)$$

la cual queda definida por la cantidad de partículas, la geometría del intercambiador de calor de lecho fluidizado y la altura del lecho.

Por otra parte el número de Reynolds de la partícula se calcula por medio de:

$$Re = \frac{v d_p \rho}{\mu} \quad (5.10)$$

Con el propósito de presentar claramente los resultados obtenidos, se presentan por separado cada intercambiador:

- 1.- El ICLF-V se operó con 3 tipos diferentes de partículas (arena con $d_p = 0.935$ mm, arena con $d_p = 1.5$ mm y perlas de vidrio con $d_p = 1.09$ mm). La figura 5.4 presenta los resultados para cada tipo de partícula utilizada en las pruebas realizadas. En relación a la figura 5.4 se puede decir que los tres tipos de partículas estudiadas tiende a un comportamiento homogéneo del lecho, ya que el flujo del fluido de trabajo (agua caliente) para altas porosidades tiende a aumentar mientras que a bajas porosidades el flujo disminuye (ver figura 5.4). Los valores de las ordenadas al origen de cada diámetro de partículas (determinadas por "b" de la gráfica Log Porosidad contra Log Reynolds), no se desvian mucho entre sí (± 5 % de su media), esto se puede observar en la tabla 5.1.

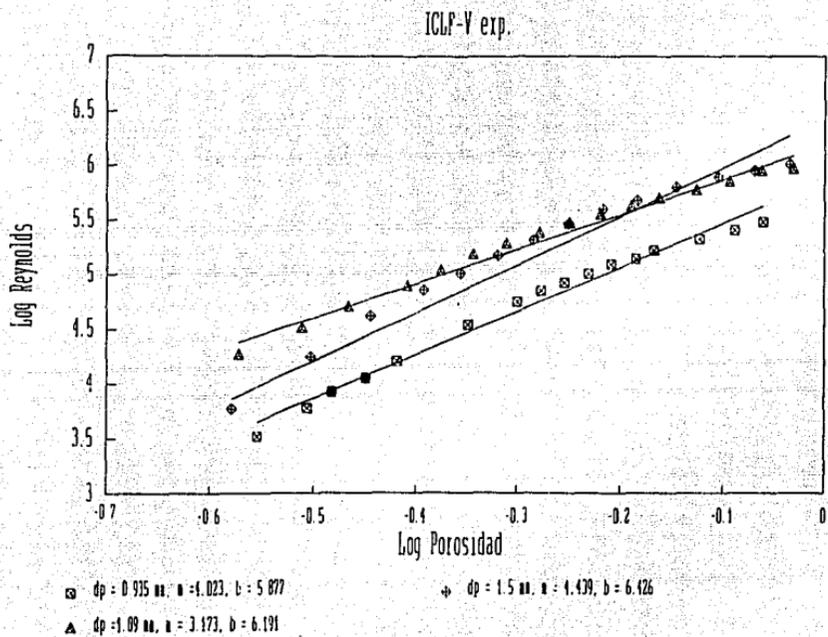


Figura 5.4 Log Porosidad vs Log Reynolds

Tabla 5.1 Valores de m y b de los datos experimentales

Diámetro de partícula [mm] ICLF-V exp.		Arena 0.935	Arena 1.5	Perlas 1.09
Pendiente	m	4.023	4.439	3.173
Ordenada	b	5.877	6.426	6.191

- 2.- El ICLF-H, se trabajó con 4 diferentes tipos de partículas (arena con $d_p = 0.625$ mm, arena con $d_p = 0.935$ mm, arena con $d_p = 1.5^p$ mm y perlas de vidrio con $d_p = 1.09$ mm). En la figura 5.5 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas efectuadas en el equipo, se puede decir de ellos que al igual que el ICLF-V antes descrito, el flujo del fluido de trabajo aumenta cuando la porosidad aumenta también. Sin embargo, el comportamiento de este hecho no es lineal, ya que alrededor de una porosidad de 0.75 (ver figura 5.5) el comportamiento (régimen) del flujo cambia drásticamente en el valor de la pendiente. Cabe mencionar que este hecho fue mencionado por Richardson de manera superflua, por lo que habrá que considerarlo en estudios posteriores del comportamiento hidrodinámico de los lecho fluidizados en el sistema bifásico líquido-sólido. Los valores de las velocidades terminales determinadas por el antilogaritmo de la ordenada al origen "b" para los rangos de porosidad menores que 0.75 difieren $\pm 7.5\%$ de su media, mientras que para los rangos de porosidades mayores de 0.75, alrededor de $\pm 5\%$ de su valor medio. De lo anterior se deduce que su expansión puede ser descrita adecuadamente.
- 3.- Finalmente se comentará al ICLF-V que opera con salmuera, este equipo ha trabajado con arena sílica de río de 0.625 mm de diámetro de partícula y se tienen muy pocos datos al respecto, debido a que su operación es demasiado laboriosa y esta sujeta a la disponibilidad de operación de las instalaciones de la Comisión Federal de Electricidad en el campo geotérmico de Los Azufres. La figura 5.6 muestra la gráfica de logaritmo de Reynolds contra logaritmo de porosidad obtenida con los datos existentes, en ella se observa el comportamiento característico del flujo del fluido de trabajo (salmuera) que se muestra en los equipos anteriores (el flujo aumenta mientras la porosidad aumenta). El rango de porosidades en el cual se trabajó, fue de 0.75 a 0.92, sin embargo el análisis de esta fase experimental de la instalación permitirá predecir su comportamiento en investigaciones futuras.

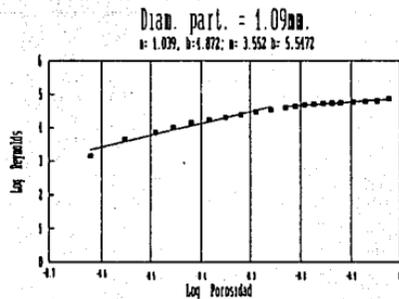
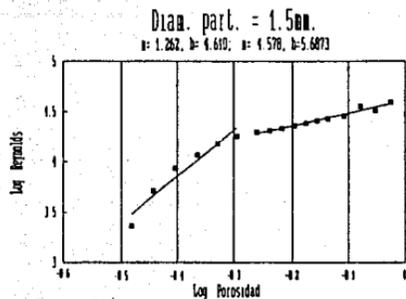
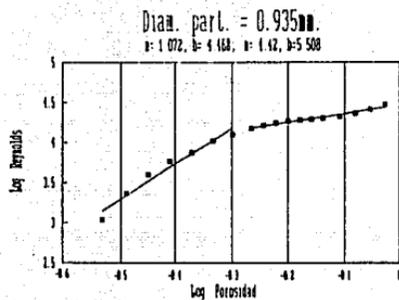
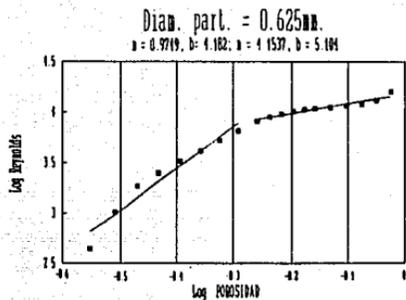


Figura 5.5 Log Porosidad vs Log Reynolds (gráficas del ICLF-H)

ICLF-V (salmuera)
 $m = 4.5, b = 5.897 ; m = 0.609, b = 5.18$

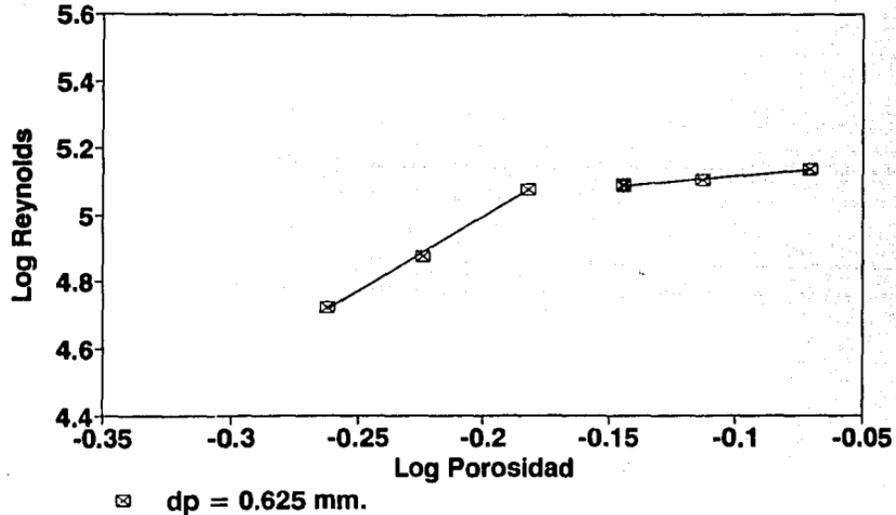


Figura 5.6 Log Porosidad vs Log Reynolds

Una vez terminado con la presentación de resultados experimentales de la parte hidrodinámica de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido, se pueden mencionar las conclusiones más importantes:

- Los rangos de variación de la velocidad terminal para distintos tamaños y tipos de partículas del ICLF-H y ICLF-V varían alrededor $\pm 5\%$ de sus respectivos valores promedios para cada intercambiador en particular (ver tabla 5.1 y 5.2)

Tabla 5.2 Valores de m y b utilizados en los cálculos

Diámetro de partícula [mm]		Arena	Arena	Arena	Perlas
ICLF-H		0.625	0.935	1.5	1.09
Pendiente	m	0.9749	1.072	1.262	1.039
Ordenada	b	4.182	4.468	4.610	4.872

- La fluidización en ICLF-V es uniforme y en el ICLF-H (ver figura 5.4 y 5.5) a veces no es uniforme.
- Se puede predecir (de acuerdo a la figura 5.6) que el ICLF-V que opera con salmuera, tendrá más de un régimen de fluidización (cambio de pendientes drásticas en la expansión del lecho) por las características propias del sistema.

TRANSFERENCIA DE CALOR

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor lecho-superficie "h", se emplearon las ecuaciones (5.3) y (5.4), y para la porosidad la ecuación (5.9), estos parámetros definen ampliamente la transferencia de calor en los intercambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido.

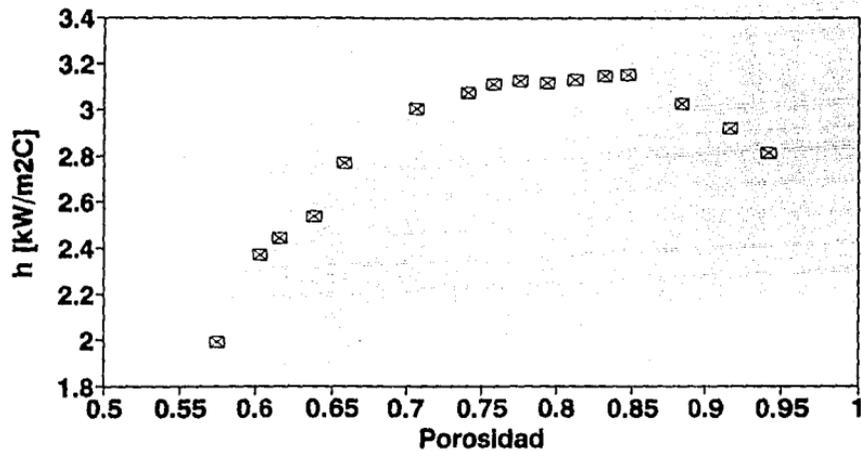
Al igual que en el punto anterior se describirá los resultados obtenidos para cada intercambiador por separado:

- 1.- El procedimiento seguido para la obtención de los datos en el ICLF-V que opera con agua fue mantener la temperatura del agua caliente constante (80 °C), la altura del lecho fluidizado L, con la menor oscilación (13 ± 1.5 m) posible, por lo que los parámetros que

variaron con el diámetro y tipo de partícula. La figura 5.7 muestra los resultados obtenidos para la arena de $d_p = 0.935$ mm, para un rango de porosidades que va de 0.55 a 0.95, en la gráfica se ve que el coeficiente de transferencia de calor va aumentando conforme la porosidad aumenta hasta que llega a un máximo y luego decrece. Se puede observar que cuando la porosidad está cerca de 0.75 el coeficiente "h", tiene un valor de 3.1 [kW/m²·C] (ver figura 5.7), pero cuando llega aproximadamente a 0.8 de porosidad decrece este valor ligeramente y luego vuelve a aumentar para una porosidad de 0.85, este comportamiento (como se verá más adelante) lo presenta en ICLF-H. En las gráficas de las figuras 5.8 y 5.9 (arena con $d_p = 1.5$ mm y perla de vidrio con $d_p = 1.09$ mm respectivamente) se observa prácticamente el mismo fenómeno de variación del coeficiente de transferencia de calor contra la porosidad, exceptuando que el valor máximo del "h" para las partículas de vidrio es de 3.45 [kW/m²·C], con las de arena ($d_p = 1.5$ mm) de 3.3 [kW/m²·C] y para arena ($d_p = 0.935$ mm) es 3.1 [kW/m²·C], con lo que se deduce que mientras aumenta el tamaño de partícula la transferencia de calor aumenta también. Por otra parte, el coeficiente máximo de transferencia de calor ocurre entre los rangos de porosidad de 0.75 y 0.85, lo cual corrobora este dato existente en la literatura revisada en el capítulo 1. Es necesario hacer notar que la buena representación de los datos es debido a la gran cantidad de datos recolectados (aproximadamente 135 000) y a la gran funcionalidad del adquirente de datos.

- 2.- El ICLF-H se operó como ya se mencionó con una sola cámara y se trabajaron con cuatro diámetros diferentes de sólidos. Las gráficas del coeficiente de transferencia de calor contra porosidad de las figuras 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13, representan los datos obtenidos para cada diámetro de partícula y tipo de material. En estas gráficas se puede observar que el máximo coeficiente de transferencia de calor ocurre aproximadamente a un valor de porosidad de 0.90. Otra característica de las gráficas son los altos valores del coeficiente de transferencia de calor (ver figuras mencionadas) y al igual que el ICLF-V el valor del coeficiente de transferencia aumenta cuando el diámetro de la partícula lo hace. La dispersión que se observa en las gráficas previas se pueden deber a los regímenes de la fluidización presentada. Sin embargo la tendencia promedio que observan las figuras mencionadas es el aumento del coeficiente de transferencia de calor mientras la porosidad se incrementa, hasta llegar a un máximo y luego decrece cuando la porosidad sigue aumentando.

ICLF-V exp.
 $d_p = 0.935 \text{ mm}$



⊗ valores experimentales

Figura 5.7 Porosidad vs h [kW/m²C]

ICL-F-V exp.
dp = 1.5 mm

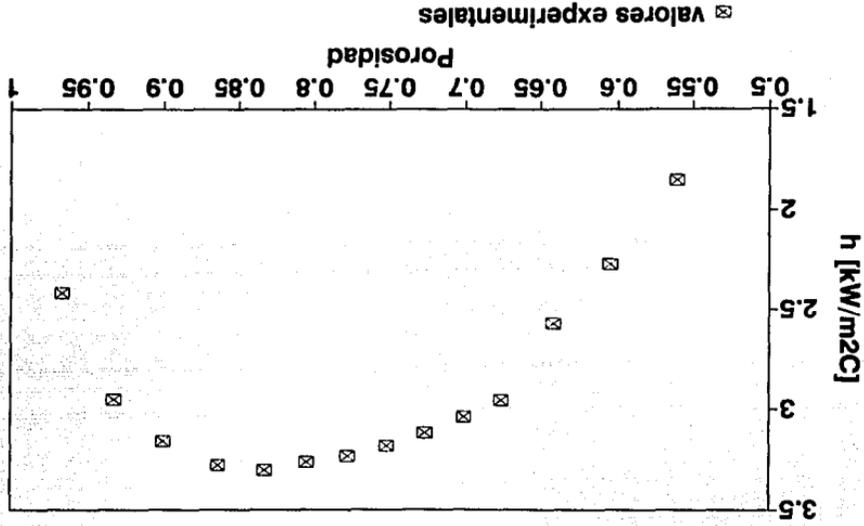


Figura 5.8 Porosidad vs h [kW/m²C]

ICLF-V exp.
dp = 1.09 mm

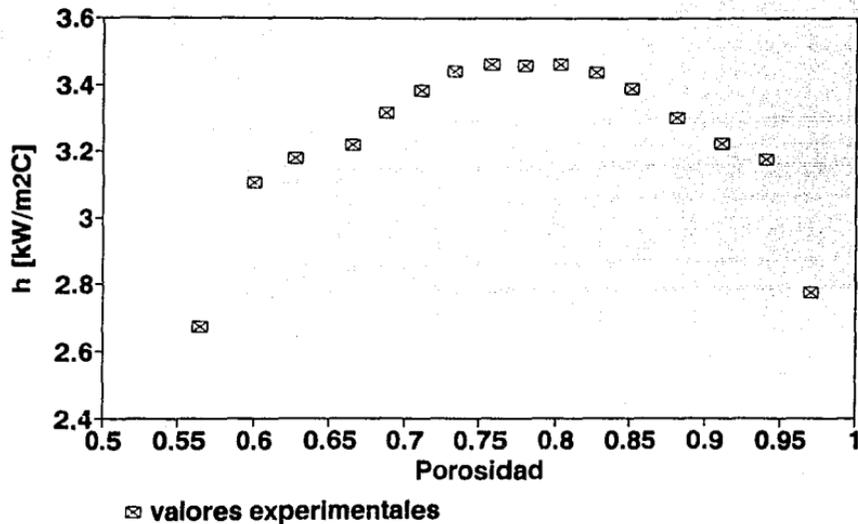


Figura 5.9 Porosidad vs h [kW/m²C]

ICLF-H
dp = 0.625 mm

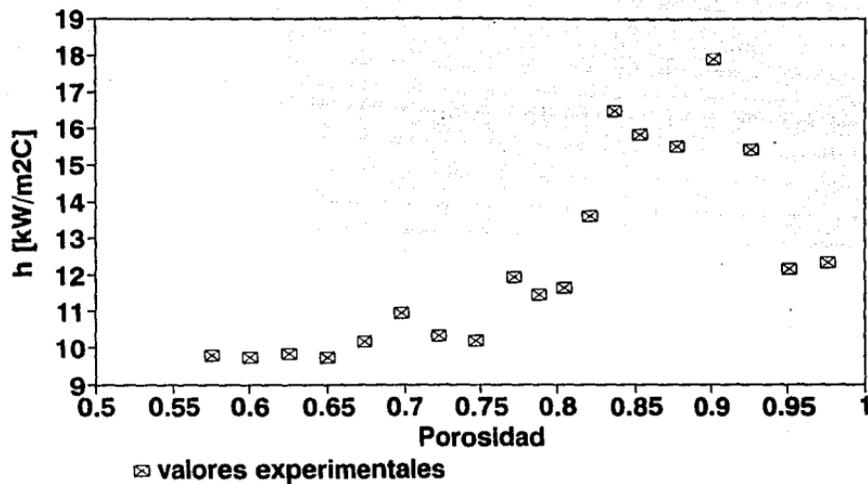


Figura 5.10 Porosidad vs h [kW/m²C]

ICLF-H
dp = 0.935 mm

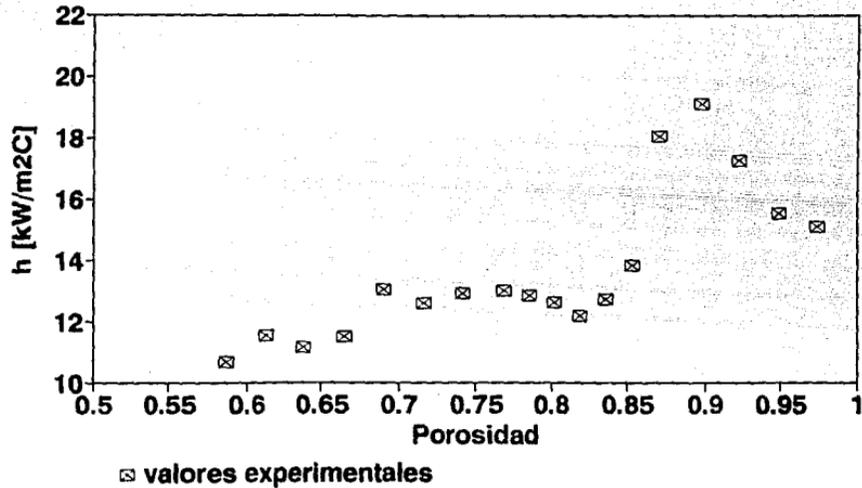


Figura 5.11 Porosidad vs h [kW/m²C]

ICLF-H
dp = 1.5 mm

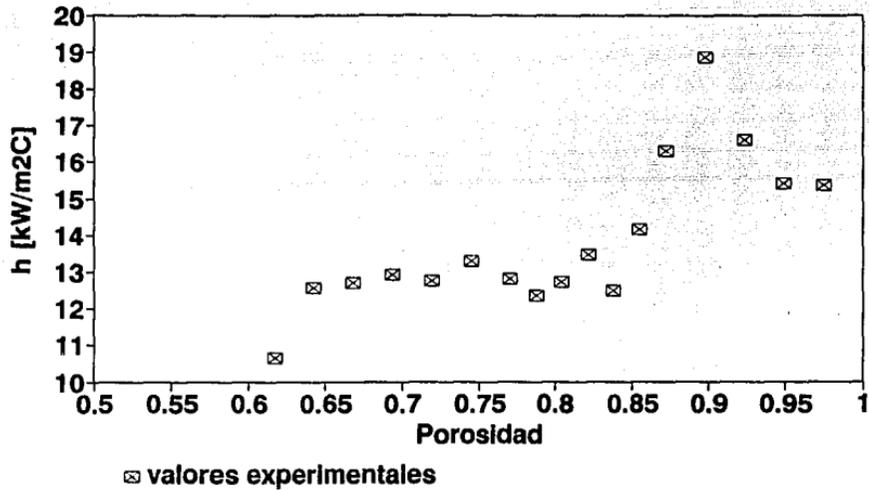


Figura 5.12 Porosidad vs h [kW/m²C]

ICLF-H
dp = 1.09 mm

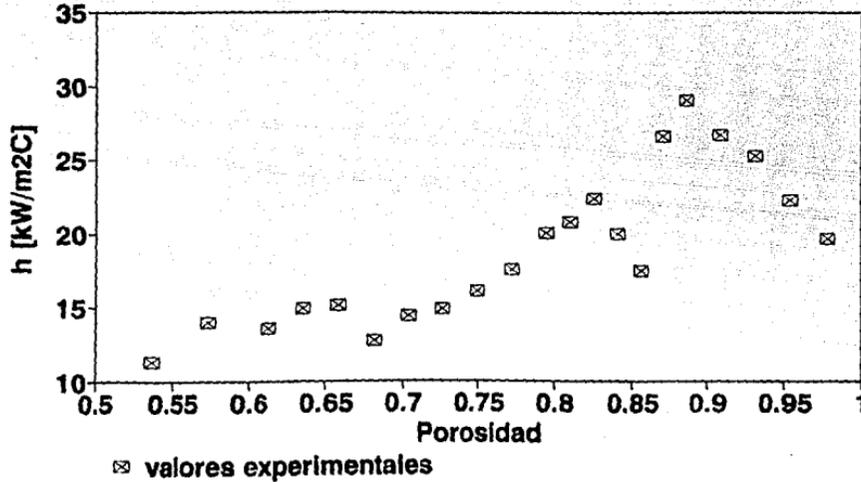


Figura 5.13 Porosidad vs h [kW/m²C]

- 3.- Para el caso del ICLF-V que trabaja con salmuera, se probó para un diámetro de partícula de 0.625mm (arena) y a una temperatura (entrada al intercambiador) promedio de la salmuera de 100 °C. La figura 5.14 muestra los datos obtenidos en este tipo de intercambiador, los valores al parecer tienen poca variación en el rango de porosidad obtenido, sin embargo los datos presentados están en los límites dentro de los cuales la literatura menciona que ocurre el máximo valor del coeficiente de transferencia de calor, por lo que se deduce que su coeficiente de transferencia de calor máximo es un poco mayor que el obtenido en el ICLF-V que opera con agua y menos de la tercera parte que el coeficiente máximo de transferencia de calor del ICLF-H.

Conclusiones más importantes de los 3 intercambiadores de calor:

- El máximo coeficiente de transferencia de calor ocurre en el rango de porosidad comprendido entre 0.75 y 0.9.
 - Los coeficientes de transferencia de calor aumentan cuando el diámetro de la partícula lo hace.
 - El intercambiador de calor de lecho fluidizado horizontal presenta altos coeficientes de transferencia de calor en comparación con los otros dos intercambiadores.
 - La dispersión de los resultados en ICLF-H (ver figuras de la 5.10 a la 5.13) se pueden deber principalmente a la no homogeneidad de la fluidización.
- d).- COMPARACION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LOS MODELOS EXISTENTES EN LA LITERATURA.

En la siguiente sección se comparan los modelos de las correlaciones encontradas en la literatura que llegan a una expresión común. La mayor parte de las correlaciones para calcular el coeficiente de transferencia de calor son de la forma:

$$Nu = ARe^a Pr^b \epsilon^c (1 - \epsilon)^d (d_p / D_c)^f \quad (5.11)$$

ICLF-V (salmuera)
 $dp = 0.625 \text{ mm}$

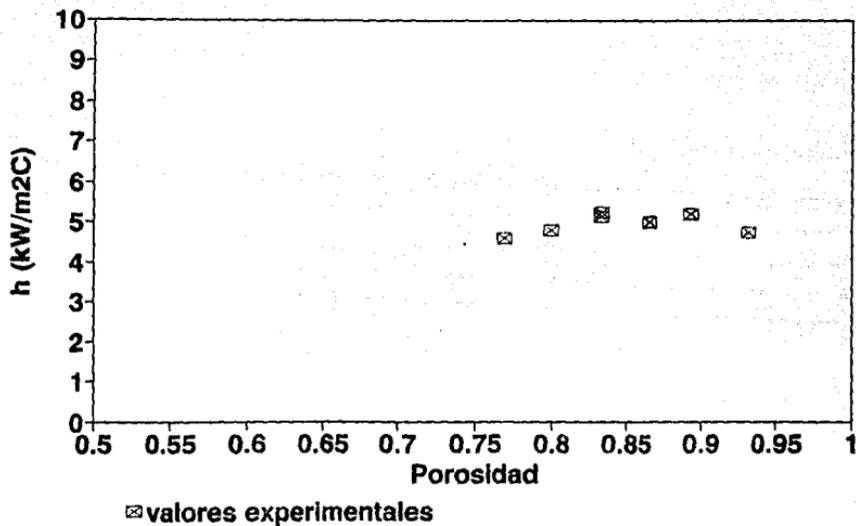


Figura 5.14 Porosidad vs h [kW/m²C]

donde:

- Re_t - Reynolds terminal (por ejemplo, el antilogaritmo de la ordenada al origen de la recta representada en un tipo de figura, como la 5.4)
 Pr - Número de Prandtl
 ϵ - Porosidad
 d_p - Diámetro de partícula
 D_t - Diámetro de la columna

y A, B, C, D, E y F son valores que cada autor ha encontrado en sus experimentos [ref. 12, 13, 14, y 15 del capítulo 2].

TABLA 5.3 VALORES DE LAS 5 CONSTANTES POR DIFERENTES AUTORES

Ref.	A	B	C	D	E	F
HAMILTON	3.38	0.565	1/3	0.565m	0.435	0.57
HAMILTON Y BREA	0.943	0.55	0.52	0.55m	0.45	0.15
RICHARDSON et al	0.67	0.62	0.33	0.62m-1	0.38	0
GRIMMET et al	1.48	0.535	1/3	0.535m	0.465	0.2

donde:

- m - exponente definido por la pendiente de la línea de Log Re vs Log Porosidad.

Además de analizar las correlaciones anteriores, se analiza la correlación que tiende a generalizar la transferencia de calor en los lechos fluidizados, la correlación de Dispenza et al [ref. 20 capítulo 2], la cual propone que:

$$h = h_c + h_p \quad (5.12)$$

donde:

$$h_c = (k/X) J_c Re_{sus} Pr_c^{(1/3)} \quad (5.13)$$

$$h_p = (k/d_p) J_p Re_p^* Pr^{(1/3)} \quad (5.14)$$

para:

$$J_c = C Re_r^A \quad (5.15)$$

$$J_p = 0.203 - 1.75 \times 10^{-3} Re_p^* \quad (5.16)$$

$$Re_{sus} = \frac{j_1 \times Q_c}{\mu_c} \quad (5.17)$$

$$Re_p = \frac{j^* d_p Q}{\mu} \quad (5.18)$$

$$j_1 = (j_f + j^*) / \epsilon \quad (5.19)$$

$$j^* = \epsilon^n (1 - \epsilon) v_f \quad (5.20)$$

$$j_f = G / (A_c Q) \quad (5.21)$$

$$Q_c = Q_{rest} + \epsilon(Q - Q_{rest}) \quad (5.22)$$

$$\mu_c = \mu e^{F(1-\epsilon)} \quad (5.23)$$

$$F = 2.5 + 14/\sqrt{\alpha} (\phi) \quad (5.24)$$

A continuación se analizan los resultados obtenidos por los autores que proponen a la ecuación (5.11) como modelo general para describir el comportamiento de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido. El análisis se efectúa para cada tipo de intercambiador de calor estudiado.

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO VERTICAL

Las figuras 5.15, 5.16 y 5.17 muestran una gráfica de porosidad contra coeficiente de transferencia de calor lecho-superficie "h" para el ICLF-V. En ellas se ponen el diámetro de partícula y los datos de las constantes de Hamilton, Hamilton y Brea, Richardson et al y Grimmet et al. Los valores de las constantes que más se acercan al comportamiento de los datos experimentales en la figura 5.15 (arena con diámetro de partícula 0.935 mm) es el que propone Grimmet et al, los demás valores de las constantes provocan que se alejen de los datos experimentales. Por lo que respecta a la figura 5.16 (arena con diámetro de partícula 1.5mm) los valores de las constantes que describen casi totalmente a lo datos experimentales es el propuesto por Hamilton y Brea. Por último, la figura 5.17 (perlas de vidrio con diámetro de partícula 1.09mm) presenta valores de las constantes obtenidas por Grimmet et al, como la curva más cercana para describir los datos obtenidos experimentalmente.

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO HORIZONTAL

Las figuras 5.18, 5.19, 5.20 y 5.21 muestran el comportamiento de las constantes propuestas por los autores antes mencionados para el intercambiador de calor de lecho fluidizado horizontal, en estas figuras se puede observar que ninguno de los valores de las constantes dan una curva que se acerque a la descripción de los datos experimentales, ya que los coeficientes de transferencia de calor son muy altos en este intercambiador.

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO VERTICAL QUE OPERA CON SALMUERA

La figura 5.22 muestra la comparación de los datos obtenidos para el ICLF-V que opera con salmuera y los modelos propuestos en la literatura, se observa que la curva que describe los resultados experimentales es la que usa los valores de las constantes propuestas por Hamilton y Brea.

MODELO DE DISPENZA et al

Como siguiente paso se analiza la correlación propuesta por Dispenza et al, las consideraciones tomadas para este análisis se basan en las ecuaciones antes descritas (5.12 a 5.24).

La correlación propuesta involucra dos contribuciones: una debida a la suspensión y la otra debida a la presencia de partículas. El coeficiente total será la suma de estas dos contribuciones.

ICLF-V exp.
 $d_p = 0.935 \text{ mm}$

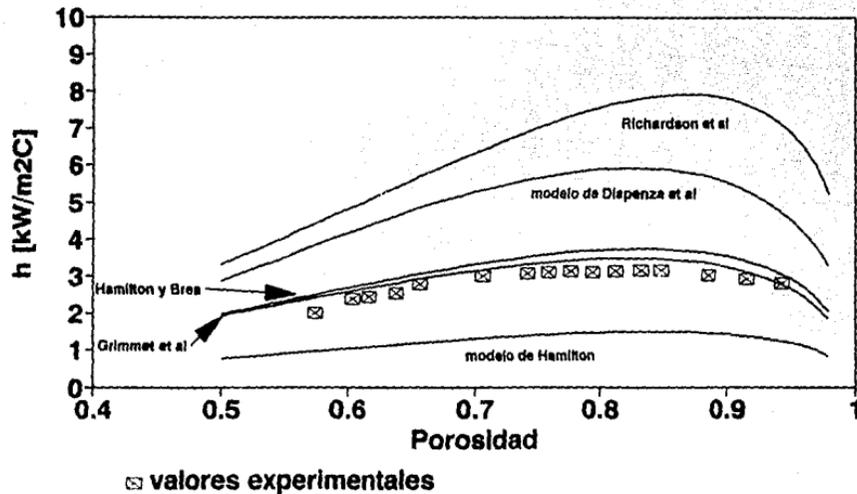


Figura 5.15 Porosidad vs h [kW/m²C]

ICLF-V exp.
dp = 1.5 mm

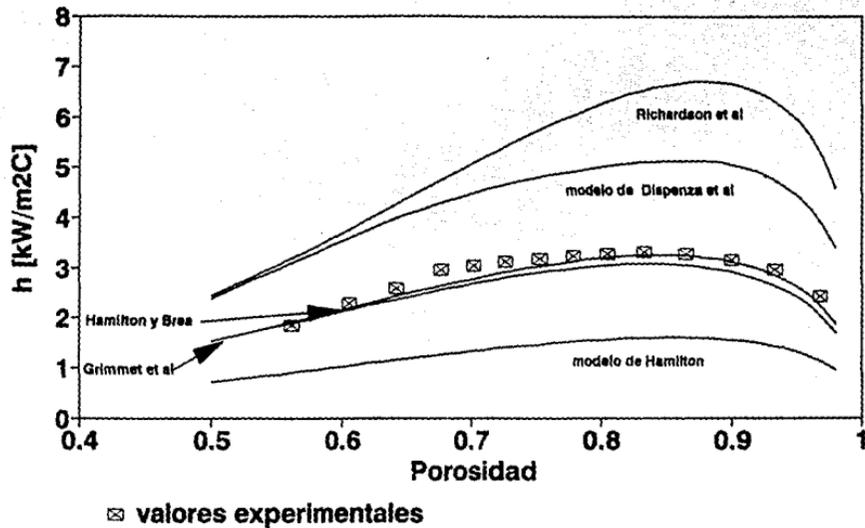


Figura 5.16 Porosidad vs h [kW/m²C]

ICLF-V exp.
 $d_p = 1.09 \text{ mm}$

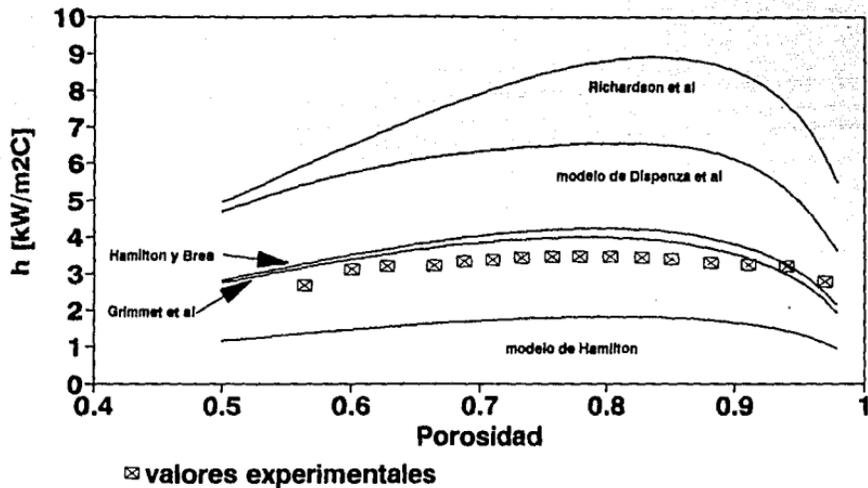


Figura 5.17 Porosidad vs h [kW/m²C]

ICLF-H
dp = 0.625 mm

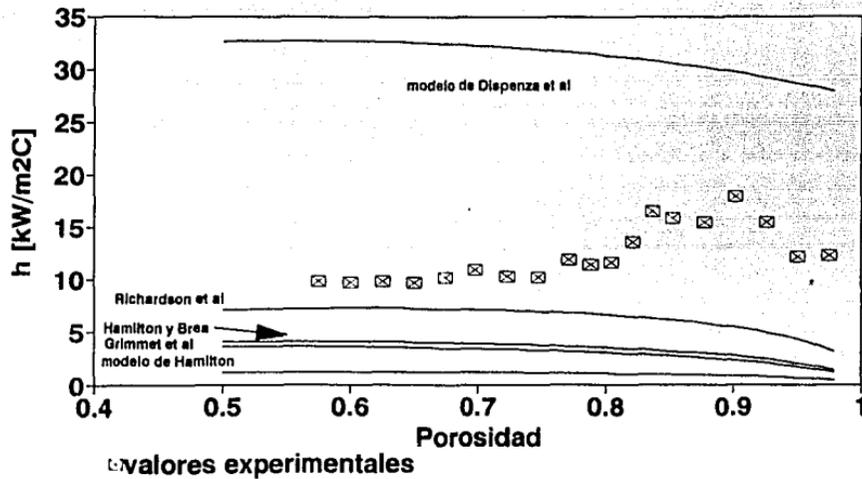


Figura 5.18 Porosidad vs h [$\text{kW/m}^2\text{C}$]

ICLF-H
dp = 0.935 mm

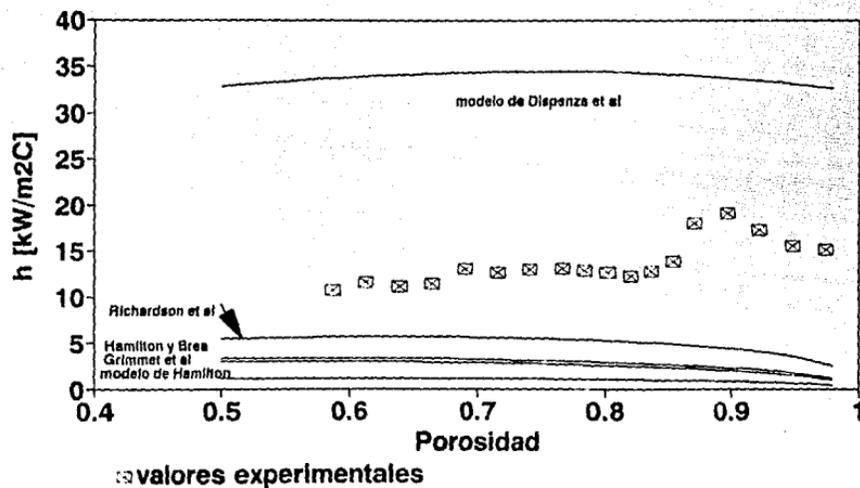


Figura 5.19 Porosidad vs h [kW/m²C]

ICLF-H
dp = 1.5 mm

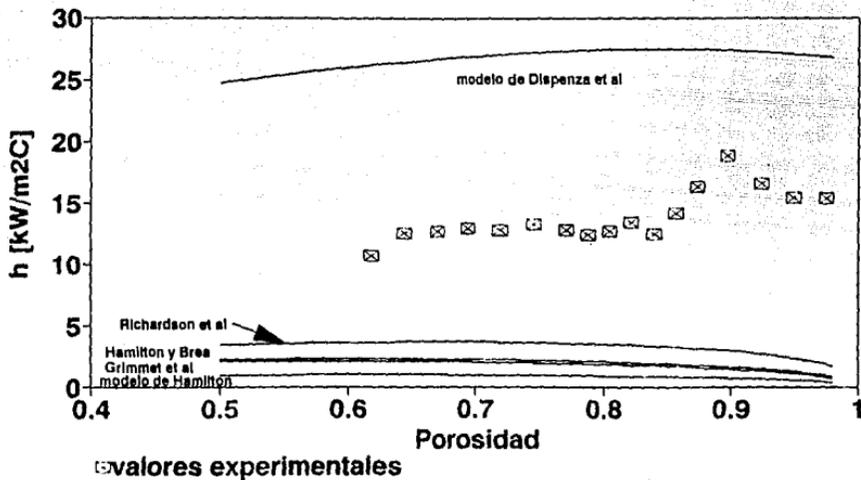


Figura 5.20 Porosidad vs h [kW/m²C]

ICLF-H
dp = 1.09 mm

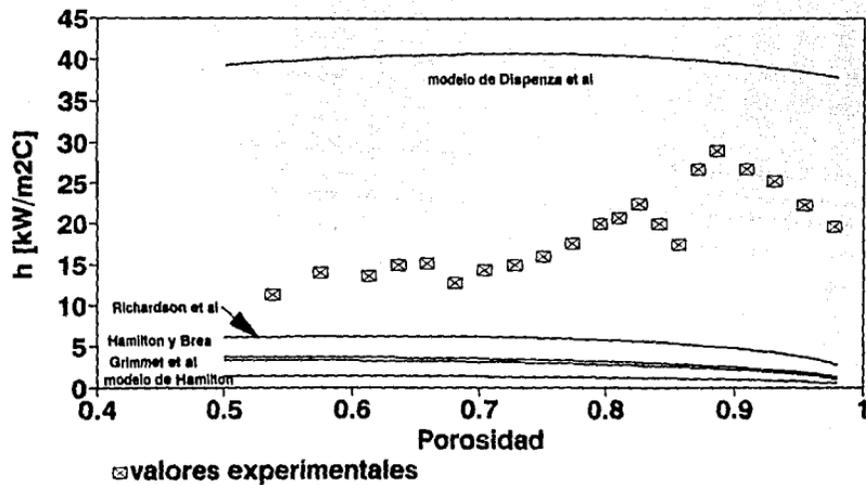
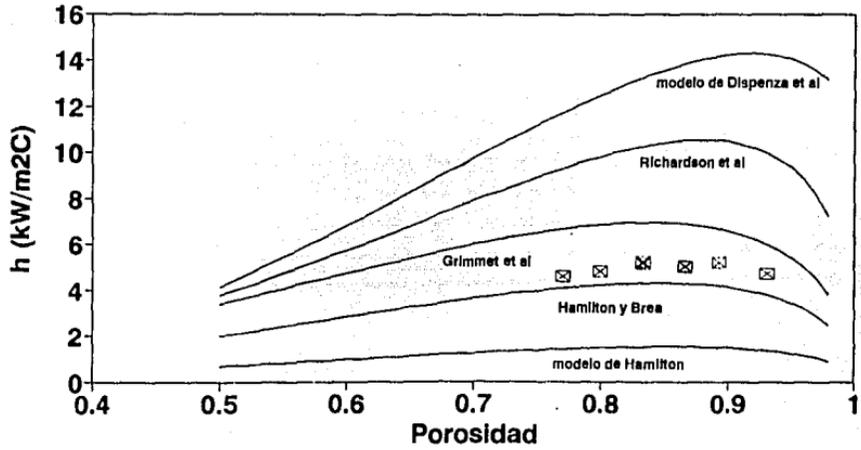


Figura 5.21 Porosidad vs h [kW/m²C]

ICLF-V (salmuera)
dp = 0.625 mm



□ valores experimentales

Figura 5.22 Porosidad vs h [kW/m²C]

La correlación para la estimación de la contribución del coeficiente de transferencia de calor h_c contiene un parámetro "X" definido como dimensión característica, el cual se relaciona con el diámetro del tubo interno de transferencia de calor (diámetro de la columna). Las figuras de la 5.15 a la 5.22 presenta al modelo de Dispenza et al junto con los otros modelos propuestos. La correlación que propone Dispenza tiende a obtener coeficientes de transferencia de calor altos (ver figuras mencionadas).

De acuerdo a los resultados obtenidos al graficar las correlaciones propuestas, se puede concluir lo siguiente:

INTERCAMBIADOR DE LECHO FLUIDIZADO VERTICAL

- Los valores de las constantes para la ecuación 5.11 propuestos por Hamilton, están limitados a coeficientes de calor bajos (no mayores de $2 \text{ [kW/m}^2\text{°C]}$), esto se puede corroborar en todas las gráficas donde aparece este modelo.
- Los resultados obtenidos (ecuación 5.11) con los valores de las constantes propuestas por Grimmet et al y Hamilton y Brea describen en una forma aproximada a los datos experimentales del ICLF-V (ver figuras 5.15, 5.16 y 5.17).
- Los valores de las constantes propuestos por Richardson et al, presenta coeficientes de transferencia de calor elevados para el ICLF-V.
- La correlación de Dispenza et al obtiene valores del coeficiente de transferencia de calor que se encuentran en medio de los otros modelos propuestos.

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO HORIZONTAL

- Para el caso del ICLF-H, de las dos correlaciones propuestas, solamente la de Dispenza et al, describe aproximadamente los altos coeficientes de transferencia de calor que presenta este intercambiador (ver figuras de la 5.18 a la 5.21). Sin embargo, la correlación de Dispenza et al obtiene valores elevados para este tipo de intercambiador.

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO VERTICAL QUE OPERA CON SALMUERA

- Finalmente para los datos experimentales del ICLF-V que opera con salmuera, se puede decir que los valores de las constantes (de la ecuación 5.11) propuestas por Hamilton y Brea describe en forma aproximada su comportamiento en el rango de porosidad mostrado en la figura 5.22.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por medio de los análisis efectuados en este trabajo, se puede concluir lo siguiente:

- 1.- Los objetivos planteados al principio del trabajo han sido cumplidos satisfactoriamente, ya que el intercambiador de calor de lecho fluidizado vertical se operó con diferentes tipos y diámetros de partículas, lo cual constituyó la obtención de 135,000 datos que inician el estudio a fondo de estos tipos de intercambiadores.
- 2.- Las correlaciones estudiadas no describen completamente los valores experimentales obtenidos, esto demuestra lo complejo de la interpretación del fenómeno de la fluidización, sin embargo los valores de la constantes que más se aproxima a la descripción de los resultados experimentales en el intercambiador de calor de lecho fluidizado vertical, son las que propone Grimmet et al, ya que el comportamiento de sus constantes fue satisfactorio en todos los resultados obtenidos. Para el caso del intercambiador de calor de lecho fluidizado horizontal, la correlación de Dispenza et al se aproxima al comportamiento de los resultados calculados en este intercambiador de calor, de la correlación propuesta se obtienen altos coeficientes de transferencia de calor que describen los datos obtenidos en el equipo horizontal.
- 3.- El diseño y construcción del intercambiador de calor de lecho fluidizado vertical, tiene una trascendencia tecnológica significativa en la solución del aprovechamiento de energía de baja entalpía con potencial incrustante. Lo anterior se deduce por la gran gama de estudios que se pueden realizar en este equipo, como es la operación con distintos tipos de superficie de intercambio de calor, tamaños y tipos de partículas, clases de fluidos, rangos de temperatura, etc.
- 4.- De las pruebas realizadas se puede decir que la instrumentación en todos los aspectos juega un papel importante en el éxito de la investigación, ya que los parámetros involucrados en la fluidización son complejos de analizar.

RECOMENDACIONES

- 1.- Es necesario continuar con la investigación de la fluidización en el sistema bifásico líquido-sólido, variando la superficie de intercambio de calor y las partículas empleadas, a fin de disponer de mayor información que permita modelar la transferencia de calor lecho-superficie.

- 2.- Es recomendable implementar un sistema que permita determinar de manera precisa y continua la altura del lecho en el intercambiador de calor, ya que este parámetro determina la porosidad de las partículas que componen al lecho. Una sugerencia de tal sistema es la de colocar una cámara de video que reproduzca las variaciones del lecho.

BIBLIOGRAFIA

- Allen C., Fukuda O., Grimmet E. Y McAtee R. "LIQUID FLUIDIZED BED HEAT EXCHANGER -HORIZONTAL CONFIGURATION EXPERIMENTS AND DATA CORRELATIONS" En: 12th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Vol. 1, Aug. 28-Sep. 2, 1977, pp. 824-831.
- Avallone E. Y Baumeister III T. "MARK'S STANDARD HANDBOOK FOR MECHANICAL ENGINEERS 9th EDITION", Ed. Mc Graw-Hill, c1987, 1786 p., ilus.
- Baker C. [y otros]. "HEAT TRANSFER IN THREE-PHASE FLUIDIZED BEDS" En: Powder Technology, Vol. 21, 1978, pp. 195-204.
- Botterill J. "FLUID-BED HEAT TRANSFER", Ed. Academic Press, c1975, 456p., ilus.
- Daizo K. Y Levespiel O.; "FLUIDIZATION ENGINEERING", Ed. Robert E. Krieger Publishing Company; New York, 1977, 534p., ilus.
- Dispenza C. [y otros] "A METHOD OF CORRELATING FLUIDIZED BED CONVECTIVE HEAT TRANSFER DATA IN HEAT TRANSFER EQUIPMENT" En: Conferencia en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1990, (Cuernavaca Morelos: 14 de agosto de 1990).
- Dispenza C. [y otros] "AN IMPROVED CORRELATION TO PREDICT THE HEAT TRANSFER CONVECTIVE COEFFICIENT BETWEEN A LIQUID FLUIDIZED BED AND HEAT TRANSFER SURFACE" En: UIT, ATIL del 3^o Congreso Nacional sul Transporte del Calore, Palermo Italy, 1985, pp. A199-A218.
- Gamiño H. Y Siqueiros J. "REPORTE INTERNO 2742/89" En: Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca Morelos 1989.
- García A. [y otros] "DEVELOPMENT IN GEOTHERMAL ENERGY IN MEXICO -PART NINE: HEAT TRANSFER EQUATION FOR DETERMINING CONVECTION COEFFICIENTS IN LIQUID-SOLID FLUIDISED BEDS" En: Heat Recovery System, Vol. 6, No. 6, 1986, pp. 483-490.
- Garside John Y Al-Dibouni Maan R. "VELOCITY-VOIDAGE RELATIONSHIPS FOR FLUIDIZATION AND SEDIMENTATION IN SOLID LIQUID SYSTEM" En: Ind. Eng. Process Des. Dev., Vol. 16, No. 2 1977, pp. 206-214.

- Hamilton W. Y Brea F. M. "HEAT TRANSFER IN LIQUID FLUIDISED BEDS WITH A CONCENTRIC HEATER" En: Trans. Chem. Engers., Vol. 49, pp. 196-203.
- Hamilton W. "A CORRELATION FOR HEAT TRANSFER IN LIQUID FLUIDIZED BEDS" En: The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 48, February 1970, pp. 52-55.
- Joshi J. "SOLID-LIQUID FLUIDISED BEDS: SOME DESIGN ASPECTS" En: Chem. Engers. Res. Des., Vol. 61, 1983, pp. 143-161.
- Khan A. [y otros] "HEAT TRANSFER FROM A PLANE SURFACE TO LIQUIDS AND TO LIQUID-SOLID FLUIDISED BEDS" En: Chemical Engineering Science, Vol. 38, No. 12, 1983, pp. 2053-2066.
- Kmiec Andrzej. "EQUILIBRIUM OF FORCES IN A FLUIDIZED BED- EXPERIMENTAL VERIFICATION" En Chemical Engineering Journal, Vol. 23, 1982, pp. 133-136.
- Lemich Robert Y Caldas Isodoro Jr. "HEAT TRANSFER TO A LIQUID FLUIDIZED BED" En: AIChE Journal, Vol. 4, No. 3, 1958, pp. 376-380.
- Mc Adams W. "HEAT TRANSMISSION 3th EDITION", Ed. Mc Graw-Hill, c1954, 532 p., ilus.
- Kern D. "PROCESS HEAT TRANSFER", Ed. Mc Graw-Hill, c 1950, 871p., ilus.
- Montgomery D. "DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS 2th EDITION", Ed. John Wiley & Sons, c1984, 538p., ilus.
- Ozisick N. "TRANSFERENCIA DE CALOR", Ed. Mc Graw-Hill, c1979, 542 p., ilus.
- Patel Rutton Y Simpson John M. "HEAT TRANSFER IN AGGREGATIVE AND PARTICULATE LIQUID-FLUIDIZED BEDS" En: Chemical Engineering Science, Vol. 32, 1977, pp. 67-74.
- Patwardhan V. S. Y Tien Chie. "SEDIMENTATION AND FLUIDIZATION IN SOLID-LIQUID SYSTEM: A SIMPLE APPROACH" En: AIChE Journal, Vol. 31, No. 1, 1985, pp. 146-149.
- Peralta J. "ESTUDIO SOBRE REMOCION DE SILICE POR MEDIO DE LECHOS FLUIDIZADOS" (Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Morelos), (en impresión).
- Perry R. Y Green D. "PERRY'S CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK 6th EDITION", Ed. Mc Graw-Hill, c1984, 2336 p., ilus.

- Richardson J. F. Y Smith J. W. "HEAT TRANSFER TO LIQUID FLUIDISED SYSTEM AND TO SUSPENTION OF COARSE PARTICLES IN VERTICAL TRANSPORT" En: Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 40, 1962, pp. 13-22.
- Richardson J.F. Y Zaki W.N. "SEDIMENTATION AND FLUIDISATION: PART I. En: Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol 32, (1954), pp. 35-44.
- Richardson J. F. [y otros] "HEAT TRANSFER FROM IMMERSERD SURFACES IN LIQUID FLUIDISED BEDS" En: Chemical Engineering Science, Vol. 31, 1976 pp. 619-624.
- Richardson J. F. Y Mitson A. E. "SEDIMENTATION AND FLUIDISATION PART II -HEAT TRANSFER FROM A TUBE WALL TO A LIQUID FLUIDISED SYSTEM" En: Trans. Instn. Chem. Engrs., vol. 36, 1958, pp. 270-282.
- Siqueiros J. [y otros] "INVESTIGACION Y DESARROLLO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO LIQUIDO-SOLIDO EN APLICACIONES GEOTERMICAS" En: XXX Convención Nacional del Instituto de Ingenieros Quimicos 1990, tomo II, (Guadalajara, Jalisco: 7 de noviembre 1990) pp. 584-595.
- Siqueiros J. [y otros] "IMPROVED EQUIPMENT FOR THE EXPLOITATION" En: International Symposium on Development and Exploitation of Geothermal Resources, Cuernavaca, Morelos, México 5-9 octubre, 1987, pp. 285-295.
- Triphathi G. Y Pandey G. N. "HEAT TRANSFER IN LIQUID FLUIDIZED BEDS" En: Indian Journal Technol., Vol. 8, August 1970, pp. 285-289.
- Wasmund B. Y Smith J. W. "WALL TO FLUID HEAT TRANFER IN LIQUID FLUIDIZED BEDS -PART 2-" En: The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 45, June 1967, pp. 156-165.
- Wasmund B. Y Smith J. W. "THE MECHANISM OF WALL TO FLUIDIZED HEAT TRANSFER IN PARTICULARLY FLUIDIZED BED" En: The Canadian Journal of Chemical Engineering, (University of Toronto, Toronto Ont.), Octubre 1965, pp. 246-251.
- Zabrodsky S. "HYDRODINAMICS AND HEAT TRANSFER IN FLUIDIZED BEDS", Ed. The Massachusetts Institute of Technology Press, c1966, 379 p., ilus.

ANEXO 1

Datos promedio del intercambiador de lecho fluidizado vertical experimental, la definición del sitio de termopar es la siguiente (ver figura 4.1):

Termopar	Definición del sitio.
BITP	Bloque inferior termopar suspendido cerca de la columna de vidrio.
BITS	Bloque inferior termopar suspendido cerca de la pared del serpentín.
BITW1	Bloque inferior primer termopar soldado a la pared del serpentín.
BITW2	Bloque inferior segundo termopar soldado a la pared del serpentín.
BMTP	Bloque medio termopar suspendido cerca de la columna de vidrio.
BMTS	Bloque medio termopar suspendido cerca de la pared del serpentín.
BMTC	Bloque medio termopar suspendido en el centro de la columna de vidrio.
BMTW	Bloque medio termopar soldado a la pared del serpentín.
BSTP	Bloque superior termopar suspendido cerca de la columna de vidrio.
BSTS	Bloque superior termopar suspendido cerca de la pared del serpentín.
BSTC	Bloque superior termopar suspendido en el centro de la columna de vidrio.
BSTW1	Bloque superior primer termopar soldado a la pared del serpentín.
BSTW2	Bloque superior segundo termopar soldado a la pared del serpentín.
TEAF	Termopar de entrada de agua fría al serpentín.
TSAF	Termopar de salida de agua fría al serpentín.
TEAFM	Termopar de entrada de agua fría sensada en la manguera.
TSAFM	Termopar de salida de agua fría sensada en la manguera.
TEAC	Termopar de entrada de agua caliente.
TSAC	Termopar de salida de agua caliente.
TTAC	Termopar en el tanque de agua caliente.

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO VERTICAL EXPERIMENTAL

DATOS PROMEDIO (ARENA DE 0.935 mm DE DIAMETRO)

PARTICULAS [kg]	3.5	5	7	9	10	11	12	13	14	15	17	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8
0 TSAC	77.3	77.0	76.7	76.3	76.0	75.9	75.5	75.3	74.8	74.6	73.4	71.4	65.2	67.7	69.2	70.8
1 T TAMBO	77.3	77.0	76.7	76.4	76.4	76.2	75.6	75.6	75.0	74.6	73.5	71.8	66.9	67.8	69.0	70.3
2 TLSS	79.6	79.5	79.4	79.4	79.3	79.3	79.2	79.3	79.1	79.3	79.0	78.2	76.5	77.3	77.5	79.7
3 TSAF	70.8	70.7	71.0	71.3	71.4	71.4	71.1	71.2	71.0	70.8	70.1	68.6	62.7	65.9	66.9	68.2
4 TM	64.3	64.0	64.8	65.7	66.2	65.9	65.6	65.7	65.5	65.0	64.3	62.3	54.6	58.4	59.9	61.7
5 TEAF	36.6	35.0	35.8	35.6	36.8	36.3	35.5	35.4	35.3	34.6	34.2	33.1	29.9	31.1	31.9	32.5
6 BWTC	78.1	78.2	78.1	78.1	78.2	78.3	78.0	78.0	77.7	77.6	77.0	75.4	68.9	71.3	73.8	75.6
7 BMIS	79.4	79.2	78.9	78.2	78.1	78.1	77.7	77.8	77.5	77.7	77.1	76.9	77.5	78.3	76.1	76.1
8 BMIP	79.5	79.5	79.0	78.2	78.1	78.0	77.6	77.7	77.4	77.6	76.9	76.8	78.3	78.5	76.2	75.7
9 BSCC	76.9	76.8	76.7	76.4	76.4	76.3	76.1	76.2	75.8	75.6	74.4	72.2	65.5	69.7	69.9	71.3
10 BSTS	78.6	78.2	77.5	77.1	77.3	77.3	77.1	77.1	76.7	76.6	75.7	74.5	75.8	75.8	75.3	75.7
11 BSIP	78.9	78.4	77.6	77.2	77.4	77.3	77.2	77.2	76.8	76.7	76.0	75.6	78.6	77.9	77.1	76.2
12 BIIP	80.0	80.0	79.9	79.7	79.7	79.6	79.4	79.6	79.5	79.7	79.4	79.2	79.4	79.1	79.4	80.1
13 IPSI1	73.0	72.8	73.1	73.3	73.5	73.3	73.0	73.1	72.9	72.7	72.1	70.7	64.3	67.4	68.3	70.1
14 IPSI2	73.0	73.0	73.2	73.5	73.6	73.4	73.3	73.4	73.2	73.0	72.5	70.9	65.1	67.8	68.7	70.6
15 IPSI3	46.1	46.0	47.0	47.1	48.1	47.5	46.7	46.6	46.2	45.7	44.8	42.3	32.3	36.3	38.0	39.9
16 IPSI2	42.1	41.2	42.2	42.1	43.1	42.7	41.7	41.5	41.4	40.8	40.1	38.3	31.5	36.7	35.5	36.9
17 TEAFM	23.9	21.2	21.8	21.4	23.0	22.2	21.1	20.9	20.9	20.4	20.7	20.8	21.5	21.1	20.9	20.8
18 TSAFM	68.6	71.4	71.7	72.0	72.0	72.0	71.7	71.8	71.6	71.5	70.8	69.3	63.5	66.7	67.6	68.9
19 TEAF	80.2	80.2	80.2	80.2	80.1	80.2	80.1	80.3	80.1	80.4	80.1	80.3	79.6	80.3	80.4	81.2
RAC	0.73	0.68	0.63	0.57	0.53	0.505	0.465	0.43	0.4	0.365	0.3	0.22	0.12	0.15	0.17	0.2
RAF	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
ALTURA LECHO [m]	1.35	1.33	1.356	1.316	1.33	1.31	1.305	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.045	1.12	1.16	1.23

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO VERTICAL EXPERIMENTAL

DATOS PROMEDIO (ARENA DE 1.5 mm DE DIAMETRO)

PARTICULAS (kg)	2	4	6	8	10	11.5	13	14.5	16	17.5	19	21	21	21
0 TSAC	77.3	77.2	76.9	76.6	76.5	76.0	75.5	74.7	74.1	73.3	72.2	70.2	67.4	62.6
1 T TAMBO	77.5	77.3	77.1	76.7	76.3	76.0	75.4	74.7	74.1	73.0	72.2	70.4	68.2	64.0
2 ILSS	79.6	79.5	79.5	79.4	79.6	79.5	79.5	79.1	79.1	79.1	78.3	77.6	77.6	73.4
3 TSAF	69.4	71.3	71.7	71.9	72.1	71.8	71.7	71.1	70.8	70.5	69.7	68.1	65.2	59.4
4 TH	62.7	66.0	66.6	66.9	66.8	66.5	66.3	65.5	65.0	64.4	63.3	61.3	57.3	50.2
5 TEAF	36.7	37.7	37.1	36.5	36.2	35.8	35.6	35.0	34.4	34.1	33.3	32.1	30.1	27.1
6 BMTG	78.4	78.3	78.5	78.4	78.5	78.2	78.0	77.4	76.9	76.8	76.2	73.1	69.4	67.4
7 BMTS	79.6	79.4	79.0	78.6	78.6	78.3	78.2	77.8	78.1	77.8	77.4	77.7	77.2	75.4
8 BMTF	79.7	79.4	79.0	78.6	78.5	78.3	78.1	77.8	77.9	77.7	77.3	77.9	78.0	76.7
9 BSTC	77.5	77.2	77.0	76.8	76.9	76.5	76.4	75.7	74.9	74.4	72.7	71.0	67.5	62.9
10 BSTS	79.0	78.5	77.7	77.6	77.7	77.6	77.5	76.9	76.7	76.0	75.4	77.0	76.6	76.0
11 BSTF	79.4	78.7	77.8	77.7	77.8	77.7	77.6	77.1	77.2	76.9	76.3	78.4	78.5	77.8
12 BITP	80.1	80.1	79.9	79.9	80.0	79.9	79.9	79.6	79.7	79.7	79.2	79.6	79.6	78.9
13 TPS11	72.0	73.5	73.7	73.9	74.1	73.8	73.7	73.2	73.0	72.7	71.6	69.9	67.4	61.7
14 TPS12	72.2	73.7	73.9	74.1	74.3	74.1	74.0	73.4	73.2	72.8	71.7	70.2	68.0	62.2
15 TPS21	42.8	48.1	48.6	48.6	48.4	47.6	47.3	46.5	45.5	44.5	43.2	39.8	35.6	29.2
16 TPS22	40.0	43.2	43.3	42.9	42.7	42.3	42.0	41.3	40.5	39.7	38.8	36.5	33.5	28.6
17 TEAFM	24.9	24.4	23.1	22.0	21.6	21.1	20.8	20.5	20.3	20.2	20.1	20.1	20.1	20.0
18 TSAFM	70.1	71.9	72.3	72.5	72.7	72.4	72.3	71.7	71.5	71.1	70.4	68.9	66.1	60.5
19 TEAC	80.3	80.2	80.1	80.2	80.4	80.3	80.4	80.1	80.4	80.6	80.4	80.3	80.0	79.4
RAC	0.77	0.73	0.69	0.63	0.56	0.52	0.46	0.4	0.35	0.3	0.26	0.21	0.15	0.1
RAF	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
ALTURA LECHO (m)	1.35	1.35	1.355	1.31	1.325	1.305	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.18	1.06

INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LECHO FLUIDIZADO VERTICAL EXPERIMENTAL

DATOS PROMEDIO (PERLAS DE VIDRIO DE 1.09 mm DE DIAMETRO)

PARTICULAS (kg)	2	4	6	8	10	11.5	13	14.5	16	17.5	19	20.5	22	22	22	22
0 TSAC	78.1	78.0	77.8	77.4	77.4	77.2	76.7	76.4	76.3	75.9	75.7	75.0	74.2	73.1	72.0	70.3
1 1 TAMBO	78.4	78.1	77.8	77.5	77.5	77.2	76.8	76.6	76.4	75.9	75.5	75.0	74.2	73.2	72.1	70.6
2 TLSS	79.9	79.8	79.7	79.4	79.6	79.6	79.3	79.3	79.4	79.5	79.4	79.2	79.0	78.7	79.2	78.7
3 TSAF	71.5	72.5	72.3	72.2	72.7	72.7	72.4	72.3	72.3	72.2	72.1	71.6	71.1	70.4	69.6	67.5
4 TM	65.5	67.1	66.8	66.8	67.9	68.0	67.8	67.5	67.5	67.1	66.7	66.0	65.5	64.3	63.0	60.7
5 TEAF	36.4	37.1	36.6	36.6	37.2	36.6	36.3	35.8	35.6	35.2	35.1	34.8	34.5	34.0	33.2	32.0
6 BNTC	78.9	78.7	78.7	78.6	78.7	78.7	78.6	78.4	78.4	78.4	78.2	77.5	76.9	75.8	75.2	73.6
7 BNTS	79.9	79.8	79.7	79.4	79.1	78.9	78.5	78.4	78.4	78.2	78.3	78.1	78.0	77.7	77.3	73.6
8 BNTP	80.0	79.8	79.8	79.4	79.1	78.9	78.5	78.4	78.4	78.2	78.3	78.1	77.9	77.5	77.1	72.9
9 BSTC	78.3	77.9	77.9	77.7	77.7	77.6	77.2	77.0	77.0	76.8	76.5	76.1	75.4	74.2	72.6	72.4
10 BS1S	79.5	79.3	78.9	78.3	78.1	78.2	77.8	77.8	77.8	77.5	77.3	77.0	76.6	75.9	75.1	75.3
11 BS1P	79.8	79.4	78.9	78.3	78.1	78.2	77.8	77.8	77.8	77.5	77.4	77.1	76.7	76.5	76.4	75.0
12 B1TP	80.3	80.2	80.2	79.9	79.9	79.9	79.7	79.7	79.8	79.7	79.8	79.7	79.7	79.6	79.8	79.8
13 TPS11	73.5	74.3	74.2	74.2	74.4	74.5	74.4	74.2	74.3	74.1	74.0	73.6	73.1	72.3	71.7	69.6
14 TPS12	73.8	74.5	74.4	74.3	74.6	74.7	74.5	74.4	74.5	74.3	74.2	73.8	73.3	72.5	72.2	70.6
15 TPS11	43.7	48.2	48.5	48.9	49.4	49.1	48.7	48.4	48.3	47.8	47.4	46.9	46.1	44.7	43.7	36.0
16 TPS22	40.5	43.4	43.2	43.3	43.9	43.4	43.3	42.9	42.7	42.4	42.1	41.6	41.2	40.3	39.0	35.0
17 TEAFM	23.8	23.6	22.5	22.2	22.5	21.5	21.2	20.8	20.4	20.3	20.2	20.2	20.1	20.2	20.3	20.4
18 TSAFM	72.0	73.0	72.9	72.8	73.2	73.3	73.0	72.9	73.0	72.8	72.7	72.3	71.8	71.1	70.4	68.4
19 TEAC	80.4	80.3	80.3	80.1	80.2	80.3	80.1	80.1	80.3	80.2	80.4	80.3	80.2	80.2	80.3	80.2
RAC	1	0.98	0.89	0.83	0.77	0.72	0.67	0.62	0.57	0.52	0.47	0.41	0.36	0.3	0.25	0.2
RAF	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
ALTURA LECHO (m)	1.35	1.33	1.33	1.335	1.325	1.32	1.305	1.3	1.305	1.3	1.3	1.3	1.3	1.17	1.09	1

ANEXO 2

Datos promedio del intercambiador de lecho fluidizado horizontal, la definición del sitio de termopar es la siguiente (ver figura 3.4):

Termopar	Definición del sitio.
00	Bloque inferior termopar soldado a la pared del serpentín.
01	Bloque superior termopar soldado a la pared del serpentín.
02	Termopar de entrada de agua caliente.
03	Termopar de salida de agua caliente.
04	Termopar de entrada de agua fría.
05	Termopar de salida de agua fría.
06	Bloque inferior termopar suspendido cerca de la pared del intercambiador (lado izquierdo).
07	Bloque inferior termopar suspendido cerca de la pared del intercambiador (lado derecho).
08	Bloque inferior termopar suspendido cerca de la pared del serpentín.
09	Bloque superior termopar suspendido cerca de la pared del serpentín.

VALORES PROMEDIO DEL ICLFH DE LOS AZUFRES MICHOACAN										CORRIDAS SIN LECHO				
FLUJO DE FLUJO DE MASA p/C ALTURA Lf No. de										TEMPERATURAS PROMEDIO				
A.F.	A.C.	grms.	[m]	datos	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
15%	20.0%	0	0	10	38.3	34.6	49.8	49.5	13.6	17.4	49.8	49.5	49.8	49.4
15%	30.0%	0	0	17	40.6	36.2	50.0	49.9	14.3	18.5	50.0	50.0	50.1	49.7
15%	40.0%	0	0	27	41.3	38.4	50.0	50.0	15.0	19.4	50.0	50.1	50.2	49.9
15%	50.0%	0	0	16	42.4	39.6	49.6	49.6	15.7	20.1	49.6	49.8	49.8	49.5
15%	60.0%	0	0	10	43.5	40.1	49.6	49.7	15.3	19.0	49.7	49.9	49.8	49.6
15%	70.0%	0	0	10	43.6	40.3	49.6	49.5	14.2	18.5	49.6	49.5	49.7	49.4
15%	80.0%	0	0	15	44.3	41.4	49.7	49.8	15.5	19.9	49.8	49.8	49.8	49.6
15%	90.0%	0	0	14	44.7	41.8	49.4	49.5	16.4	20.7	49.6	49.6	49.6	49.3
15%	100.0%	0	0	10	45.3	42.6	49.9	49.9	17.4	21.6	49.9	50.2	50.1	49.7
15%	110.0%	0	0	11	45.4	42.7	49.6	49.7	17.7	22.0	49.6	49.8	49.8	49.4
15%	120.0%	0	0	11	45.7	42.9	49.7	49.8	16.3	21.0	49.8	49.9	49.9	49.7

VALORES PROMEDIO DEL ICLFH DE LOS AZUFRES MICHOACAN										SERIC 6, Días. Part. = 0.625mm. (arena)				
FLUJO DE FLUJO DE MASA p/C ALTURA Lf No. de										TEMPERATURAS PROMEDIO				
A.F.	A.C.	grms.	[m]	datos	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
15%	14.0%	5200	0.185	22	40.2	36.4	49.9	49.4	19.5	23.2	49.7	49.2	49.8	49.3
15%	20.0%	4900	0.185	22	40.1	36.0	49.7	49.4	19.2	22.9	49.5	49.2	49.6	49.3
15%	26.0%	4600	0.185	25	40.8	35.7	49.9	49.7	19.3	23.0	49.8	49.5	49.9	49.6
15%	29.5%	4300	0.185	24	41.0	36.1	49.9	49.8	19.5	23.1	49.8	49.4	49.9	49.6
15%	33.0%	4000	0.185	25	41.7	36.1	49.9	49.8	19.0	22.6	49.9	49.4	49.6	49.6
15%	36.5%	3700	0.185	24	41.9	36.1	49.9	49.8	18.5	22.2	49.9	49.3	49.9	49.8
15%	40.5%	3400	0.185	25	42.2	35.6	50.0	49.8	18.3	21.9	49.9	49.5	49.9	49.8
15%	44.5%	3100	0.185	26	43.1	36.0	50.0	49.8	18.3	21.7	50.0	49.6	50.0	49.7
15%	49.0%	2800	0.185	24	44.2	35.8	49.9	49.8	19.4	23.1	49.9	49.8	50.0	49.7
15%	51.0%	2600	0.185	25	43.4	35.4	49.9	49.9	19.1	22.9	49.9	49.8	50.0	49.7
15%	52.5%	2400	0.185	24	43.0	36.3	49.9	49.8	18.8	22.7	49.9	49.9	50.0	49.7
15%	54.0%	2200	0.185	24	43.7	39.2	49.9	49.8	18.8	22.5	49.9	49.9	50.0	49.7
15%	55.0%	2000	0.185	25	44.1	42.3	49.9	49.9	18.7	22.4	49.9	49.9	50.0	49.8
15%	55.5%	1800	0.185	24	44.1	41.7	49.9	49.9	17.7	21.4	50.0	49.9	50.0	49.8
15%	56.0%	1500	0.185	26	44.5	40.8	49.9	49.9	17.4	21.0	49.9	48.3	49.9	49.8
15%	57.0%	1200	0.185	25	45.0	40.9	49.8	49.8	16.0	20.0	49.9	50.1	50.0	49.4
15%	58.0%	900	0.185	24	44.3	39.4	49.8	49.7	15.4	19.4	49.8	49.9	49.9	49.7
15%	60.0%	600	0.185	24	42.7	37.6	50.0	49.9	14.0	17.9	50.0	50.0	50.1	49.9
15%	65.5%	300	0.185	25	42.7	36.9	49.9	49.9	12.6	16.7	50.0	49.9	50.0	49.8

VALORES PROMEDIO DEL ICLFH DE LOS AZUFRES MICHOACAN

SERIE 8, Diam. part. = 0.735mm. (arena)

FLUJO DE FLUJO DE MASA p/C ALTURA Lf No. de				TEMPERATURAS PROMEDIO										
A.F.	A.C.	gram.	[m]	No. de	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
15X	20.5X	4800	0.180	29	42.2	38.9	49.8	49.6	18.8	22.0	49.8	49.6	49.9	49.7
15X	28.5X	4500	0.180	25	43.0	39.8	49.9	49.8	18.7	21.9	49.9	49.9	49.9	49.8
15X	36.0X	4200	0.180	26	42.8	40.0	49.9	49.8	18.7	22.0	50.0	50.2	50.3	50.2
15X	42.5X	3900	0.180	26	43.1	40.2	50.0	49.9	18.7	21.8	50.0	50.0	50.0	49.7
15X	47.5X	3600	0.180	24	43.8	40.4	49.9	50.0	19.1	22.5	50.0	50.1	50.2	49.9
15X	55.0X	3300	0.180	25	43.7	40.0	49.9	49.9	19.1	22.5	49.9	50.1	50.1	49.8
15X	59.5X	3000	0.180	27	44.1	40.1	49.8	49.8	18.7	22.0	49.9	49.9	50.0	49.8
15X	64.0X	2700	0.180	21	44.0	40.0	49.9	49.9	18.7	22.1	49.9	50.1	50.1	49.8
15X	66.5X	2500	0.180	26	44.1	40.5	49.9	50.0	18.8	22.0	50.0	50.1	50.1	49.9
15X	68.5X	2300	0.180	25	43.7	40.2	49.8	49.8	18.3	21.6	49.9	50.0	50.0	49.8
15X	70.0X	2100	0.180	26	43.4	40.0	49.9	49.9	18.1	21.4	49.9	50.0	50.0	49.8
15X	71.0X	1900	0.180	25	43.4	41.1	49.9	49.9	17.8	21.1	50.0	50.0	50.4	49.9
15X	71.5X	1700	0.180	26	43.9	41.2	49.9	49.9	17.3	20.7	50.0	50.0	50.1	49.9
15X	72.5X	1500	0.180	25	45.6	42.8	49.8	49.9	17.2	20.6	49.9	50.2	50.1	49.8
15X	74.0X	1200	0.180	26	45.8	42.8	49.9	49.9	17.2	20.8	49.9	50.2	50.1	49.8
15X	77.0X	900	0.180	28	45.7	42.0	49.8	49.9	17.4	20.8	49.9	50.1	50.1	49.8
15X	81.0X	600	0.180	24	45.1	41.7	49.8	49.9	17.2	20.6	49.9	50.1	50.0	49.8
15X	86.0X	300	0.180	26	44.9	42.7	49.9	49.9	16.9	20.0	49.9	49.9	50.0	49.8

VALORES PROMEDIO DEL ICLFH DE LOS AZUFRES MICHOACAN

SERIE 9, Diam. part. = 1.5mm. (arena)

FLUJO DE FLUJO DE MASA p/C ALTURA Lf No. de				TEMPERATURAS PROMEDIO										
A.F.	A.C.	gram.	[m]	No. de	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
15X	28.5X	4500	0.180	30	43.1	40.8	50.0	49.9	18.0	20.9	50.1	50.0	50.1	49.9
15X	40.0X	4200	0.180	21	43.5	41.3	49.9	49.9	18.9	22.1	49.9	50.2	50.0	49.8
15X	50.0X	3900	0.180	23	44.1	41.6	50.0	50.0	18.5	21.5	50.1	50.2	50.2	49.9
15X	57.0X	3600	0.180	26	43.9	41.3	49.9	50.0	18.9	22.0	50.1	50.2	50.2	49.8
15X	64.0X	3300	0.180	26	43.9	41.7	49.9	50.0	18.2	21.3	50.1	50.2	50.2	49.9
15X	69.0X	3000	0.180	26	44.0	41.7	49.9	50.0	17.9	21.1	50.1	50.2	50.2	49.9
15X	71.5X	2700	0.180	26	43.8	41.7	50.0	50.1	17.6	20.7	50.1	50.2	50.2	50.0
15X	73.0X	2500	0.180	26	43.7	41.3	49.9	49.9	16.4	19.5	50.0	50.0	50.1	49.9
15X	74.5X	2300	0.180	26	43.6	41.2	50.0	50.0	15.0	18.2	50.1	50.0	50.1	50.0
15X	76.5X	2100	0.180	26	44.1	40.9	49.9	49.9	17.0	20.3	50.0	50.1	50.1	49.9
15X	78.5X	1900	0.180	28	44.2	41.0	49.9	49.9	17.4	20.4	50.0	50.1	50.1	49.9
15X	80.5X	1700	0.180	26	44.3	42.0	49.9	49.9	16.0	19.2	50.0	50.0	50.1	49.9
15X	82.0X	1500	0.180	28	45.1	42.6	49.8	49.9	17.0	20.1	49.9	50.2	50.1	49.8
15X	84.5X	1200	0.180	26	46.0	42.7	49.8	49.9	16.4	19.8	49.9	50.2	50.0	49.8
15X	93.0X	900	0.180	26	45.7	42.0	49.8	49.9	15.9	19.2	49.9	50.1	50.0	49.8
15X	89.0X	600	0.180	26	45.4	41.4	49.8	50.0	15.2	18.6	50.0	50.1	50.1	49.9
15X	97.0X	300	0.180	26	45.0	41.7	49.8	49.9	13.0	16.3	49.9	50.0	50.0	49.8

VALORES PROMEDIO DEL ICLFN DE LOS AZUFRES MICHGACAN

SERIE 7, Diam. part. = 1.00mm. (perlas)

FLUJO DE MASA p/C ALTURA Lf					TEMPERATURAS PROMEDIO									
A.F.	A.C.	grms.	[m]	No. de datos	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
15X	23.0X	6100	0.180	30	43.0	39.8	49.9	49.8	20.7	23.9	49.9	49.8	50.0	49.6
15X	38.0X	5600	0.180	24	44.1	40.6	49.8	49.8	20.3	23.7	49.8	49.8	49.9	49.6
15X	46.5X	5100	0.180	26	44.0	40.4	49.9	49.8	20.1	23.6	49.9	49.6	50.1	49.7
15X	54.0X	4800	0.180	26	44.0	40.8	49.9	49.8	19.7	23.3	49.9	49.8	50.1	48.9
15X	62.0X	4300	0.180	26	44.1	40.6	49.9	49.9	19.4	23.0	49.9	49.8	50.1	48.9
15X	67.5X	4200	0.180	25	44.0	40.2	49.4	49.8	19.6	22.7	49.9	49.7	49.9	49.3
15X	73.5X	3900	0.180	26	44.3	40.6	50.0	49.9	18.7	22.2	50.0	49.8	50.1	49.6
15X	79.0X	3600	0.180	27	44.4	41.2	49.8	49.8	20.8	24.3	49.1	50.0	50.0	49.8
15X	85.5X	3300	0.180	26	45.0	41.1	49.8	49.8	20.5	24.1	49.3	49.9	50.0	49.8
15X	92.0X	3000	0.180	26	44.9	42.4	49.8	49.8	20.6	24.2	49.8	49.9	50.0	49.8
15X	98.0X	2700	0.180	26	45.6	43.6	49.9	49.9	19.9	23.5	50.0	50.1	50.1	49.9
15X	102.0X	2500	0.180	26	45.2	44.1	49.7	49.7	19.4	22.9	49.8	49.9	49.9	49.7
15X	106.0X	2300	0.180	26	45.6	44.9	50.0	50.0	19.2	22.8	50.1	50.1	50.1	50.0
15X	108.5X	2100	0.180	26	45.7	44.6	50.1	50.1	18.9	22.2	50.1	50.1	50.2	50.0
15X	111.0X	1900	0.180	29	45.6	45.3	50.0	50.0	19.1	21.8	50.1	50.0	50.1	50.0
15X	112.5X	1700	0.180	27	45.9	45.2	49.7	49.8	18.0	21.8	49.8	50.0	49.9	49.7
15X	114.0X	1500	0.180	26	46.3	45.2	49.6	49.7	17.4	21.3	49.7	49.9	49.8	49.6
15X	115.5X	1200	0.180	26	46.4	44.3	49.7	49.7	17.1	21.0	49.7	49.9	49.8	49.6
15X	117.5X	900	0.180	26	46.3	43.5	49.6	49.7	16.9	20.8	49.7	49.8	49.8	49.6
15X	119.0X	600	0.180	26	46.0	42.9	49.9	49.9	16.8	20.6	49.9	50.0	50.0	49.8
15X	127.0X	300	0.180	25	45.6	42.7	49.8	49.9	15.6	19.3	49.9	49.9	50.0	49.8

ANEXO 3

Datos promedio del intercambiador de lecho fluidizado vertical que opera con salmuera, cabe mencionar que algunos termopares se desoldaron. La definición del sitio de termopar es la siguiente (ver figura 3.5):

Termopar	Definición del sitio.
1	Termopar de entrada de agua fría.
2	Termopar de salida de agua fría.
3	Termopar de entrada de salmuera.
4	Termopar de salida de salmuera.
5	Bloque inferior termopar soldado en la pared del primer tubo del serpentín (lado izquierdo).
6	Bloque inferior termopar soldado en la pared del segundo tubo del serpentín (lado izquierdo).
7	Bloque inferior termopar soldado en la pared del tercer tubo del serpentín (lado izquierdo).
8	Bloque superior termopar soldado en la pared del primer tubo del serpentín (centro).
9	Bloque superior termopar soldado en la pared del segundo tubo del serpentín (centro).
10	Bloque superior termopar soldado en la pared del tercer tubo del serpentín (centro).
11	Bloque inferior termopar soldado en la pared del primer tubo del serpentín (lado derecho).
12	Bloque inferior termopar soldado en la pared del segundo tubo del serpentín (lado derecho).
13	Bloque inferior termopar soldado en la pared del tercer tubo del serpentín (lado derecho).
14	Bloque inferior termopar suspendido cerca de la pared del serpentín.
15	Bloque medio termopar suspendido cerca de la pared del serpentín.
16	Bloque superior termopar suspendido cerca de la pared del serpentín.

DATOS OBTENIDO EN EL ICLF-V QUE OPERA CON SALMUERA
(arena de 0.625 mm de diámetro)

PARTICULAS (kg)	ALTURA LECHO (m)	TIEMPO (s)	temperaturas (milivolts)													flujo agua (gpm)			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		14	15	16
16.0	1.9	30.15	1.31	2.48	4.99	4.52	0.00	1.98	1.99	2.26	2.17	2.21	3.12	3.12	3.20	4.92	4.69	4.58	12.0
16.0	1.9	29.95	1.33	2.36	4.98	4.48	0.00	0.00	1.93	2.16	2.06	2.08	2.88	2.85	2.99	4.87	4.65	4.52	15.5
16.0	1.9	30.15	1.33	2.53	4.99	4.53	0.00	0.00	2.03	2.27	2.18	2.22	3.15	3.13	3.29	4.92	4.70	4.59	12.0
16.0	1.9	31.38	1.30	2.85	5.04	4.63	0.00	0.00	2.13	2.36	2.39	2.40	2.53	3.49	3.57	4.98	4.79	4.68	8.0
16.0	1.9	29.95	1.34	2.36	4.97	4.47	0.00	0.00	0.00	2.17	2.08	2.12	2.84	2.89	3.01	4.86	4.62	4.52	15.5
25.0	1.9	30.88	1.33	2.47	4.97	4.46	0.00	0.00	0.00	2.12	2.01	2.04	0.00	0.00	2.84	2.96	4.82	4.61	15.5
25.0	1.9	30.98	1.34	2.72	5.04	4.54	0.00	0.00	0.00	2.27	2.18	2.22	0.00	3.13	3.29	4.90	4.72	4.60	12.0
25.0	1.9	30.88	1.32	2.47	4.98	4.46	0.00	0.00	0.00	2.09	2.00	2.06	0.00	2.83	3.02	4.82	4.62	4.50	15.5
25.0	1.9	30.98	1.32	2.69	5.01	4.53	0.00	0.00	0.00	2.24	2.15	2.22	0.00	3.10	3.30	4.89	4.68	4.58	12.0
25.0	1.9	32.71	1.36	3.06	5.03	4.61	0.00	0.00	0.00	2.54	2.43	2.47	0.00	3.54	0.00	4.92	4.77	4.65	8.0
31.5	1.9	31.38	1.34	2.43	4.99	4.43	0.00	0.00	0.00	2.12	1.98	1.99	0.00	0.00	0.00	4.79	4.56	4.45	15.5
31.5	1.9	31.68	1.31	2.99	5.04	4.59	0.00	0.00	0.00	2.45	2.29	2.33	0.00	0.00	0.00	4.87	4.71	4.61	8.0
31.5	1.9	31.38	1.35	2.45	4.99	4.44	0.00	0.00	0.00	2.10	2.00	2.08	0.00	0.00	0.00	4.82	4.61	4.49	15.5
31.5	1.9	31.79	1.29	2.57	4.95	4.46	0.00	0.00	0.00	2.16	2.06	2.15	0.00	0.00	0.00	4.83	4.62	4.52	12.0
31.5	1.9	31.79	1.35	2.63	4.96	4.48	0.00	0.00	0.00	2.24	2.11	2.18	0.00	0.00	0.00	4.84	4.64	4.53	12.0
39.0	1.9	31.87	1.32	2.43	4.94	4.38	0.00	0.00	0.00	2.09	1.99	2.06	0.00	0.00	0.00	4.77	4.55	4.44	15.5
39.0	1.9	31.87	1.34	2.47	4.94	4.38	0.00	0.00	0.00	2.10	1.99	2.08	0.00	0.00	0.00	4.77	4.56	4.44	15.5
39.0	1.9	31.89	1.36	2.64	4.98	4.46	0.00	0.00	0.00	2.27	2.10	2.18	0.00	0.00	0.00	4.84	4.63	4.52	12.0
39.0	1.9	31.99	1.30	2.80	4.98	4.49	0.00	0.00	0.00	2.33	2.22	2.29	0.00	0.00	0.00	4.85	4.64	4.55	10.0
39.0	1.9	32.40	1.34	3.02	5.03	4.58	0.00	0.00	0.00	2.52	2.35	2.40	0.00	0.00	0.00	4.89	4.74	4.64	8.0
39.0	1.9	31.89	1.32	2.63	4.98	4.46	0.00	0.00	0.00	2.25	2.09	2.18	0.00	0.00	0.00	4.83	4.62	4.51	12.0
47.0	1.9	38.84	1.33	2.52	4.96	4.37	0.00	0.00	0.00	2.54	2.35	2.40	0.00	0.00	0.00	4.89	4.74	4.64	8.0
47.0	1.9	38.84	1.30	2.19	4.96	4.29	0.00	0.00	0.00	2.19	2.03	2.06	0.00	0.00	0.00	4.87	4.65	4.34	12.0
47.0	1.9	38.84	1.32	2.92	4.94	4.40	0.00	0.00	0.00	2.48	2.29	2.36	0.00	0.00	0.00	4.83	4.53	4.42	8.0
47.0	1.9	38.84	1.32	2.32	4.97	4.26	0.00	0.00	0.00	2.09	1.92	1.98	0.00	0.00	0.00	4.78	4.43	4.30	15.5
56.0	1.9	44.63	1.34	2.47	4.96	4.23	0.00	0.00	0.00	2.11	2.00	2.03	0.00	0.00	0.00	4.70	4.36	4.25	12.0
54.0	1.9	45.36	1.35	2.28	4.96	4.17	0.00	0.00	0.00	1.97	1.89	1.96	0.00	0.00	0.00	4.64	4.32	4.17	15.5

CONTINUA...

0.00 - TERMOPAR DESOLDADO

DATOS OBTENIDO EN EL ICLF-V QUE OPERA CON SALMUERA
(arena de 0.625 mm de diámetro)

PARTICULAS [kg]	ALTURA LECHO [m]	TIEMPO flujo [s]	flujo salmuera [m3/hr]	Presión entrada [(lb/in2)]	Presión salida [(lb/in2)]	Presión alimentación [(lb/in2)]	Presión separación [(lb/in2)]
16.0	1.9	30.15	7.322	15.0	8.8	17.5	45
16.0	1.9	29.95	7.372	15.0	8.3	18.0	45
16.0	1.9	30.15	7.322	15.0	8.8	17.5	45
16.0	1.9	31.38	7.036	15.2	10.0	18.0	45
16.0	1.9	29.95	7.372	15.0	8.3	18.0	45
25.0	1.9	30.88	7.150	15.5	8.0	18.0	48
25.0	1.9	30.98	7.125	16.0	8.7	17.5	48
25.0	1.9	30.88	7.150	15.5	8.0	18.0	48
25.0	1.9	30.98	7.125	16.0	8.7	17.5	48
25.0	1.9	32.71	6.750	16.0	9.7	18.0	48
31.5	1.9	31.38	7.035	15.0	7.8	17.5	48
31.5	1.9	31.68	6.968	16.0	9.8	18.0	48
31.5	1.9	31.68	6.968	16.0	9.8	18.0	48
31.5	1.9	31.38	7.035	15.0	7.8	17.5	48
31.5	1.9	31.79	6.945	15.0	8.0	17.0	47
31.5	1.9	31.79	6.945	15.0	8.0	17.0	47
39.0	1.9	31.87	6.926	15.0	7.3	17.0	48
39.0	1.9	31.87	6.926	15.0	7.3	17.0	48
39.0	1.9	31.89	6.922	15.3	8.1	17.0	48
39.0	1.9	31.99	6.900	15.5	8.5	17.5	48
39.0	1.9	32.40	6.814	16.3	9.4	18.0	48
39.0	1.9	31.89	6.922	15.3	8.1	17.0	48
39.0	1.9	32.40	6.814	16.3	9.4	18.0	48
47.0	1.9	38.84	5.684	15.0	9.1	16.0	48
47.0	1.9	38.84	5.684	15.0	9.1	16.0	48
47.0	1.9	38.84	5.684	15.0	8.6	16.0	48
47.0	1.9	38.84	5.684	15.3	8.9	16.0	48
54.0	1.9	44.83	4.925	15.0	8.7	15.8	48
54.0	1.9	45.36	4.867	15.5	8.3	15.5	48