

Programa de Investigación Interdisciplinaria

**Informe parcial de avance del proyecto:
Desarrollo de modelos semi-empíricos para el diseño de
intercambiadores compactos auto-limpiadores.**

Presentado por los responsables del proyecto:

Dr. Christopher Heard Wade
División de División de
Ciencias de la Comunicación y Diseño

Dr. José Javier Valencia López
División de División de
Ciencias Naturales e Ingeniería

Participantes del Proyecto

Oscar García Aranda (Programa de Doctorado)

Valaur E. Márquez Baños (Programa de Doctorado)

Fernando A. López Mata (Programa de Maestría)

Daniel Camacho Ibarra (Licenciatura en Ingeniería Biológica)

1 Actividades realizadas

1.1 Equipo experimental

1.1.1 Adecuación de las instalaciones experimentales.

Los principales adquisiciones de equipo experimental fueron relacionados con mejorar y adecuar la instalación experimental (Figura 1). Además de las instalaciones iniciales en el local de la empresa Eficiencia ThermoE. S.A. De C.V. se integró otra instalación experimental de menor escala (Figura 2).



Figura 1 Instalación experimental al inicio del proyecto.



Figura 2 Instalación experimental menor al inicio del proyecto.



Figura 3 Codo acondicionador de flujo.



Figura 4 Estabilizador de flujo.

Se integraron los dos sistemas experimentales para aprovechar la instrumentación existente. La empresa Eficiencia ThermoE. S.A. De C.V. adquirió un variador de velocidad de mayor capacidad para la bomba principal del sistema durante el periodo de vedado otoñal de adquisiciones de la UAM de 2015. Se adquirió un medidor de flujo de agua adicional para cubrir los flujos del sistema de fluidización a menor escala integrado al sistema principal. Se desarrollaron diseños de componentes auxiliares para la instalación de fluidización a menor escala. Estos fueron principalmente codos con estructura interna para reducir considerablemente las asimetrías de flujo generados en

un codo sencillo (Figura 3). El desarrollo fue derivado de una tecnología existente de guías de flujo que se anteponen a un codo^{1,2}. La tecnología de la impresión 3D permite el uso de otras geometrías para imponer el mismo régimen de flujo pretendido de manera positiva dentro del codo. El desarrollo permitió establecer flujo adecuado en un espacio limitado para el equipo de menor escala. Esto fue de gran importancia debido al uso de una serie de codos para conducir el flujo desde el medidor de flujo hasta el tramo experimental de fluidización. Además se utilizó un estabilizador de flujo con un diseño derivado de los patentes US4,929,088 y US4,981,368, también fabricado mediante el uso de una impresora 3D (Figura 4).

Se desarrollaron una serie de baffles con diferentes inclinaciones y cantidades de 'arranques' para estudiar los efectos de inclinación y diámetro hidráulico del canal



Figura 5 Baffles espirales con variaciones de inclinación y diámetro hidráulico de los canales de flujo.

en lo cual se realiza la fluidización con partículas de diferentes esfericidades (Figura 5).



Figura 6 Partículas para estudios de fluidización.

Se utilizaron una gama de partículas con geometrías variadas (Figura 6).



Figura 7 Manómetro múltiple de columnas de agua.

Se fabricó e integró un sistema de manómetros de columna de agua al sistema de fluidización de diámetro menor (Figura 7). Esto con el fin de permitir medición de diferencias de presión en el lecho fluidizado bajo una gama de porosidades del lecho y esfericidades de las partículas.

Se diseñaron y fabricaron una conjunto de flotadores de diferentes densidades

para ampliar el rango de flujos medibles con el rotámetro adquirido por el proyecto (Figura 8).



Figura 8 Flotadores para ampliar el rango de medición del rotámetro.



Figura 9 Sistema integrado experimental en operación al final del periodo reportado.

Al final del periodo el sistema de menor escala de fluidización estaba en funcionamiento integrado con el sistema principal.



Figura 10 Equipo para fluidización de partículas.



Figura 11 Ensamble de la impresora 3D tipo 'Delta'.

Se adquirió un juego de componentes para armar una impresora 3D para uso exclusivo del proyecto (Figura 11). La impresora actualmente se encuentra ensamblado y bajo pruebas de calibración. Se seleccionó el tipo de impresora (Geometría 'Delta') para permitir la impresión de objetos cilíndricos con un tamaño adecuado para el sistema de fluidización de mayor diámetro sin la necesidad de partirlos en el plano vertical.

1.1.2 Desarrollos

Se desarrollaron los dibujos necesarios para la impresión de los componentes

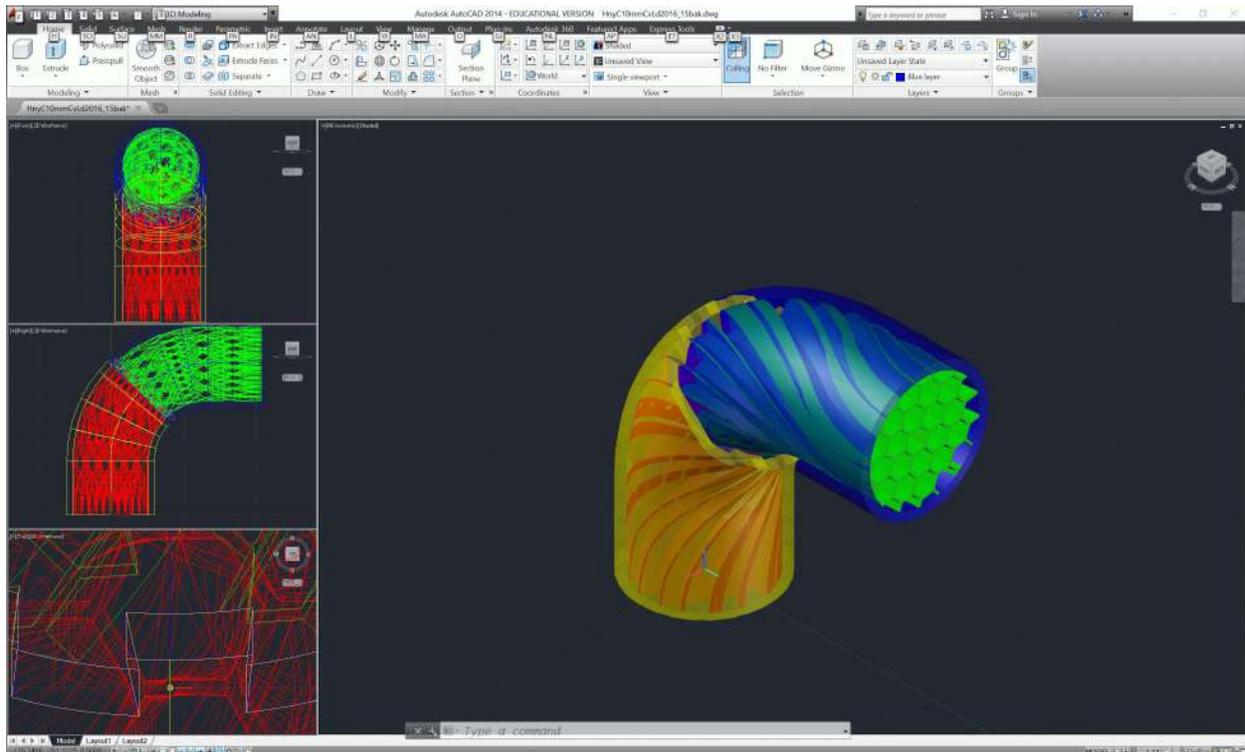


Figura 12 Dibujo para imprimir codo acondicionador de flujo.

utilizados en el equipo experimental. (Figuras 12 al 14). Para permitir el dibujo de los baffles espirales se desarrolló una hoja de cálculo para calcular series de puntos con coordinas Cartesianas definiendo las curvas de los superficies.

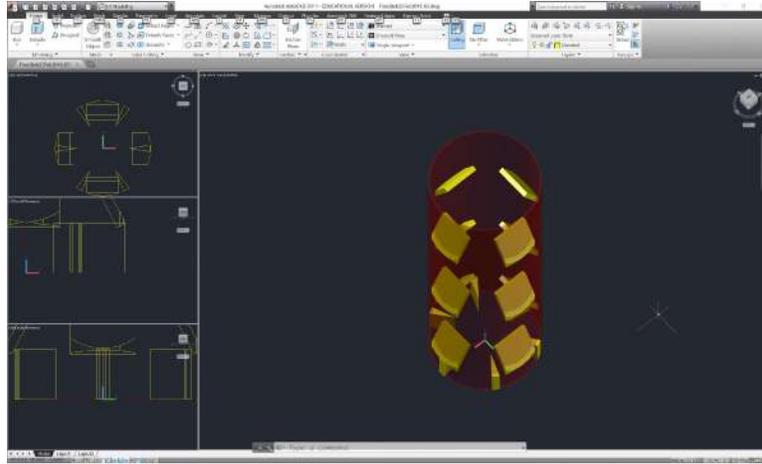


Figura 13 Dibujo de acondicionador de flujo para impresión.

Se realizaron estudios de caracterización de las partículas para fluidización (Figuras 15 al 17). A continuación las características de las partículas:

Partícula #1 Esférica (\varnothing 1.50 mm)

$$\rho = 10.031 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\varepsilon = 0.284_{\text{reposo}}$$

$$\Psi = 1$$

Partícula #2 Esférica (\varnothing 2.64 mm)

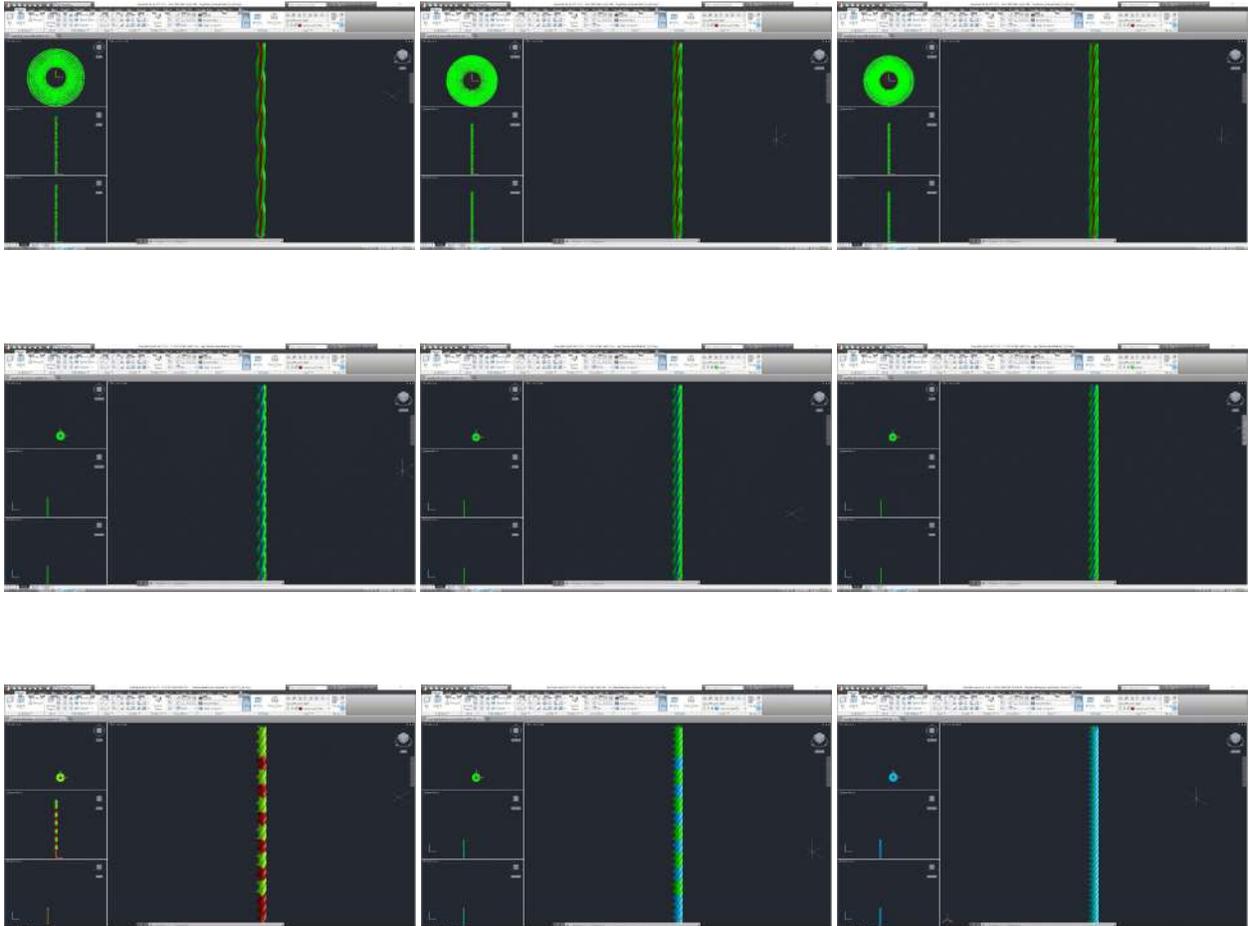
$$\rho = 9.570 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\varepsilon = 0.242_{\text{reposo}}$$

$$\Psi = 1$$

Partícula #3 Saturno (L 5.72, \varnothing 6.68 mm)

$$\rho = 8.25 \text{ g.cm}^{-3}$$



$$\varepsilon = 0.236_{\text{reposo}}$$

$$\Psi = 0.808$$

Partícula #4 Cilindro diagonal (L 3.97, Ø 3.37 mm)

$$\rho = 8.24 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\varepsilon = 0.184_{\text{reposo}}$$

$$\Psi = 0.923$$

Partícula #5 Cilindro recto (L 2.30, Ø 2.30 mm)

$$\rho = 7.325 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\varepsilon = 0.222_{\text{reposo}}$$

$$\Psi = 0.873$$

Partícula #6 Aguja (L 9.36, Ø 3.22 mm)

$$\rho = 8.26 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\varepsilon = 0.358_{\text{reposo}}$$

$$\Psi = 0.891$$

Partícula #7 Esférica (Ø 3.21 mm)

$$\rho = 6.90 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\varepsilon = 0.264_{\text{reposo}}$$

$$\Psi = 1$$

FV(gpm)	m3/s	V (m/s)	# Reynolds	P#1	P#2	P#3	P#4	P#5	P#6	P#7
			Re	ΔP cmH2O						
4	0.0002524	0.1675	7307.826	33.4	41	34.9	33.2	27.7	18.3	13.1
5	0.0003155	0.2094	9134.782	34.1	43.2	35.6	34.2	28.4	19.3	14.6
6	0.0003786	0.2513	10961.739	36.6	44	37.2	35.1	30.2	20.4	15.3
7	0.0004417	0.2931	12788.695	38.5	45	38	36.9	31.1	21.6	16.6
8	0.0005048	0.3350	14615.651	39.9	45.5	39	37.4	32.1	22.1	17.1
9	0.0005679	0.3769	16442.608	41	46.5	40	38.4	29.6	22.6	18.6
10	0.000631	0.4188	18269.564	39	47.4	39	39.2	26.1	19.9	19.3
11	0.0006941	0.4607	20096.521	35.4	48	39	38.2	23.6	18.8	20.3
12	0.0007572	0.5025	21923.477	34	49	37.7	36.4	ARRASTRE	17.1	19.6
13	0.0008203	0.5444	23750.433	ARRASTRE	49	36.9	33.9	L=70cm	ARRASTRE	18.6
14	0.0008834	0.5863	25577.390	L=65cm	50.2	36.6	32.1		L=40cm	16.6
15	0.0009465	0.6282	27404.346		49.2	33.1	ARRASTRE			15.1
16	0.0010096	0.6701	29231.303		46	ARRASTRE	L=80cm			14.5
17	0.0010727	0.7119	31058.259		43	L=70cm				13.1
18	0.0011358	0.7538	32885.216		42					11.3
19	0.0011989	0.7957	34712.172		40					ARRASTRE
20	0.001262	0.8376	36539.128		36					L=83cm
					ARRASTRE					
					L=90cm					

Figura 15 Valores iniciales de fluidización.

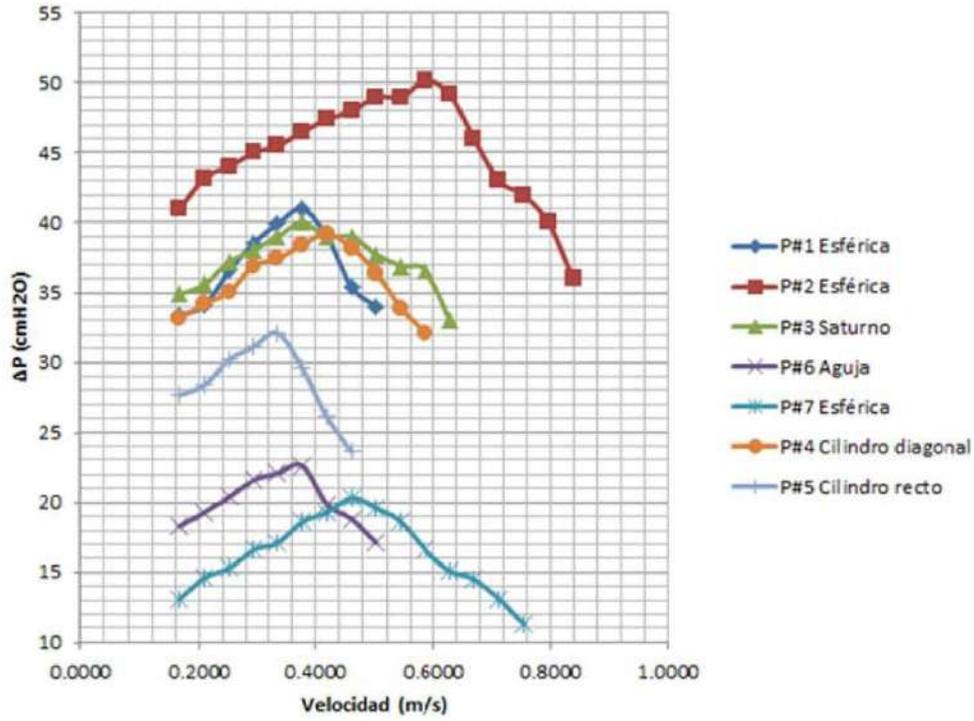


Figura 16 Caida de presión por fricción en función de la velocidad superficial del líquido para las partículas monodispersas.

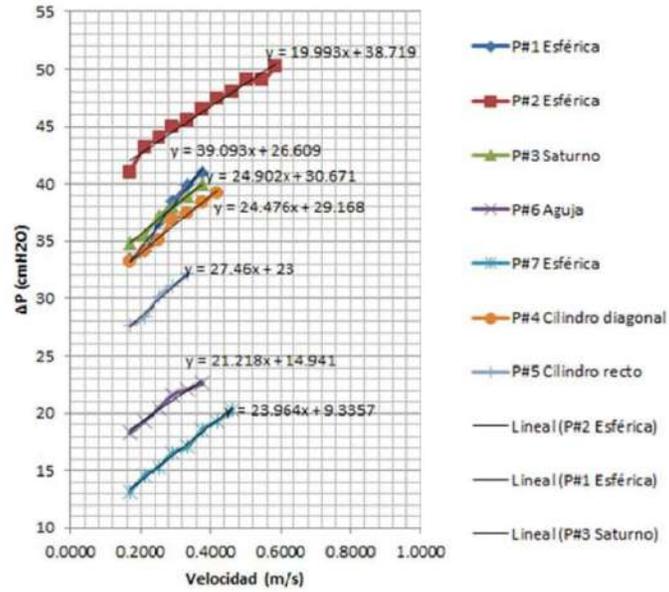


Figura 17 Caida de presión por fricción en función de la velocidad superficial del líquido para las partículas lecho fijo.

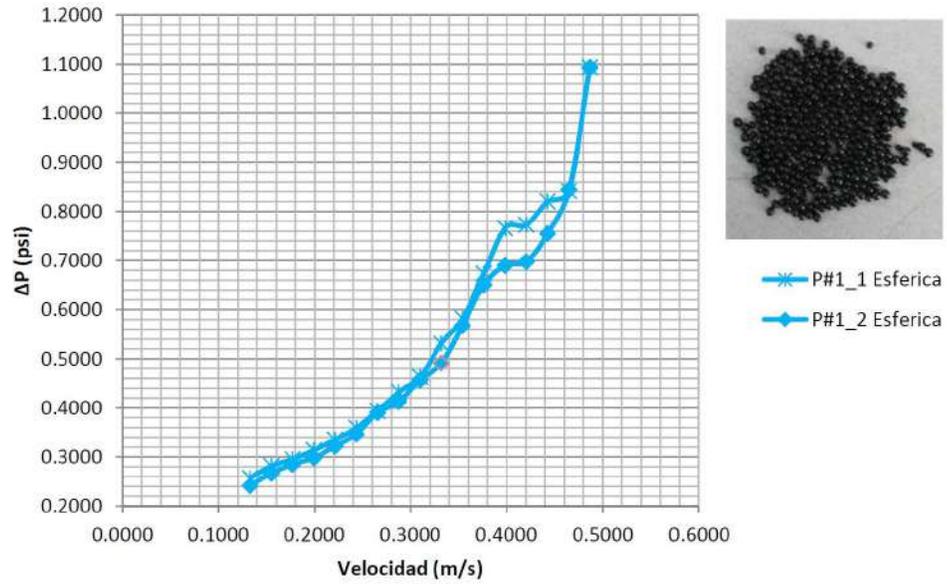


Figura 18 Caida de presión para las partículas #1 en lecho fluidizado.

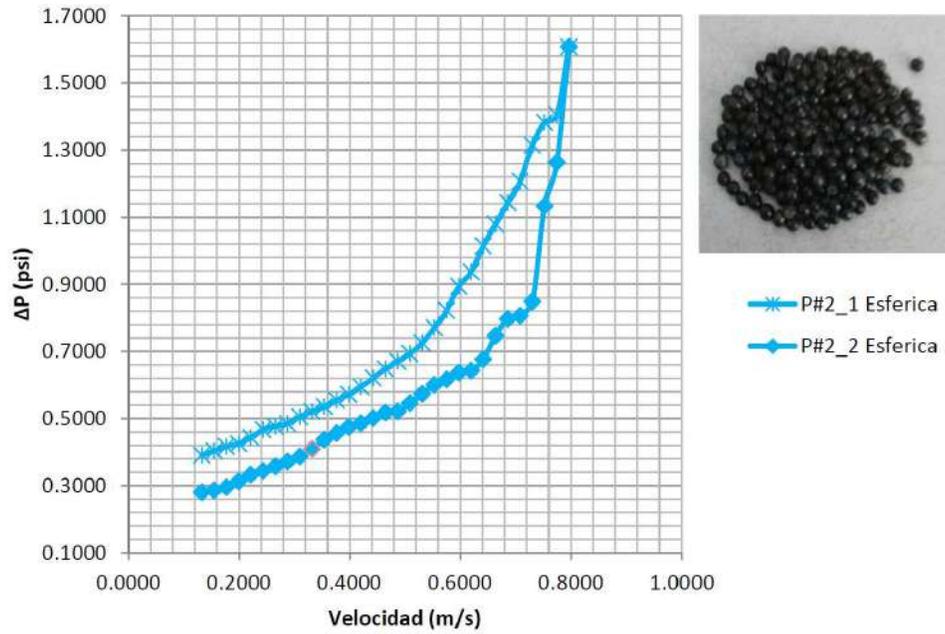


Figura 19 Caída de presión para las partículas #2 en lecho fluidizado.

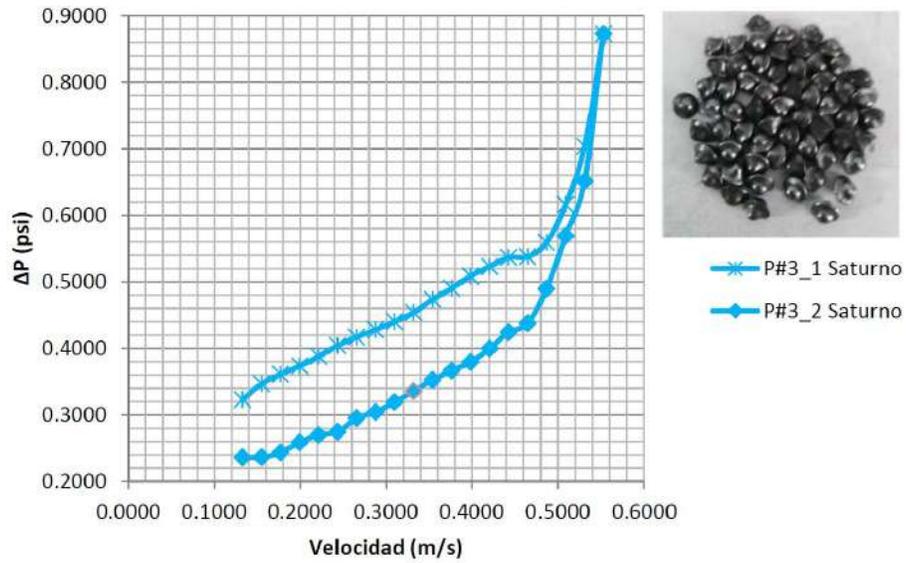


Figura 20 Caida de presión para las partículas #3 en lecho fluidizado.

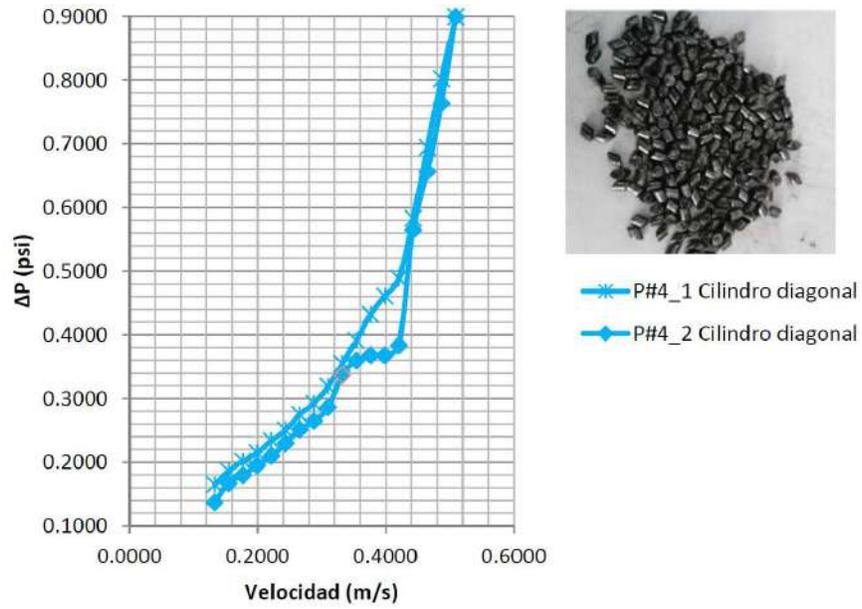


Figura 21 Caída de presión para las partículas #4 en lecho fluidizado.

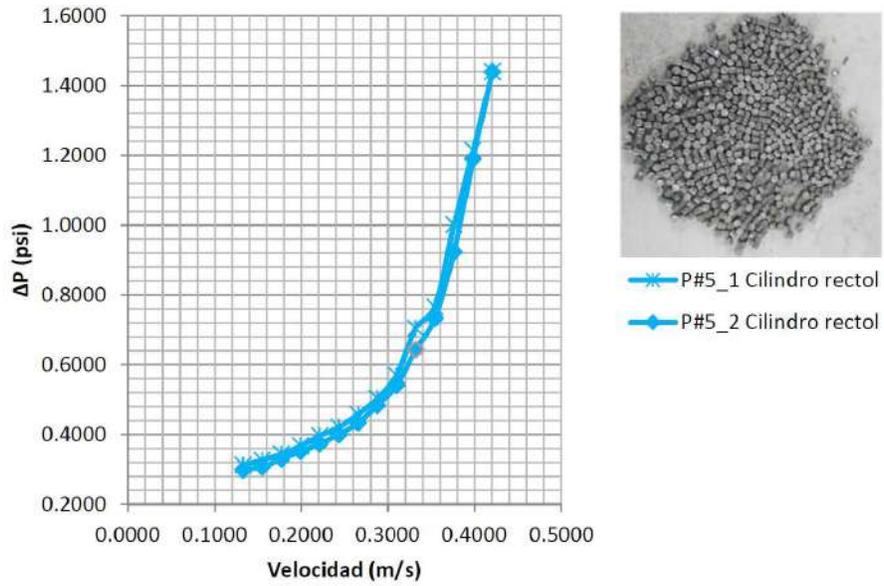


Figura 22 Caída de presión para las partículas #5 en lecho fluidizado.

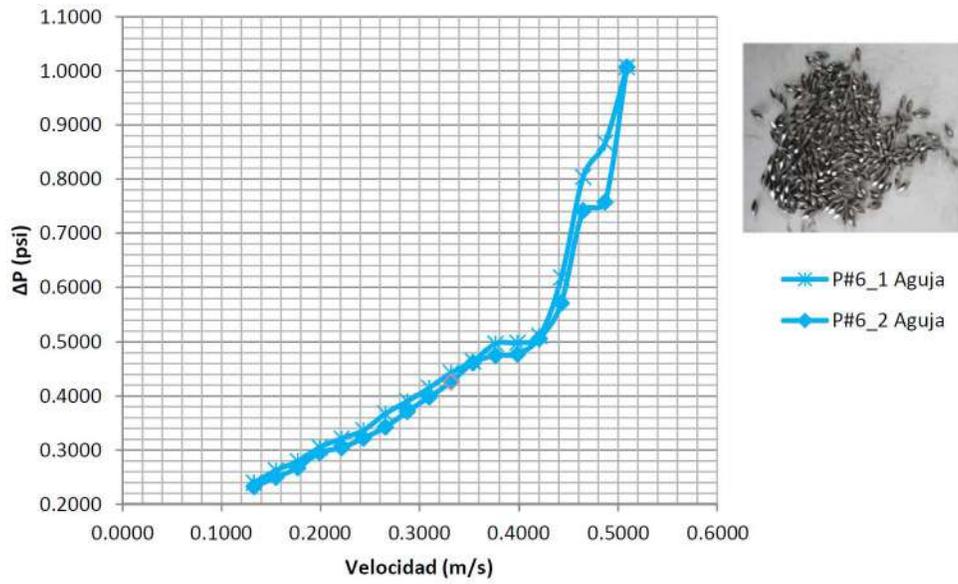


Figura 23 Caida de presión para las partículas #6 en lecho fluidizado.

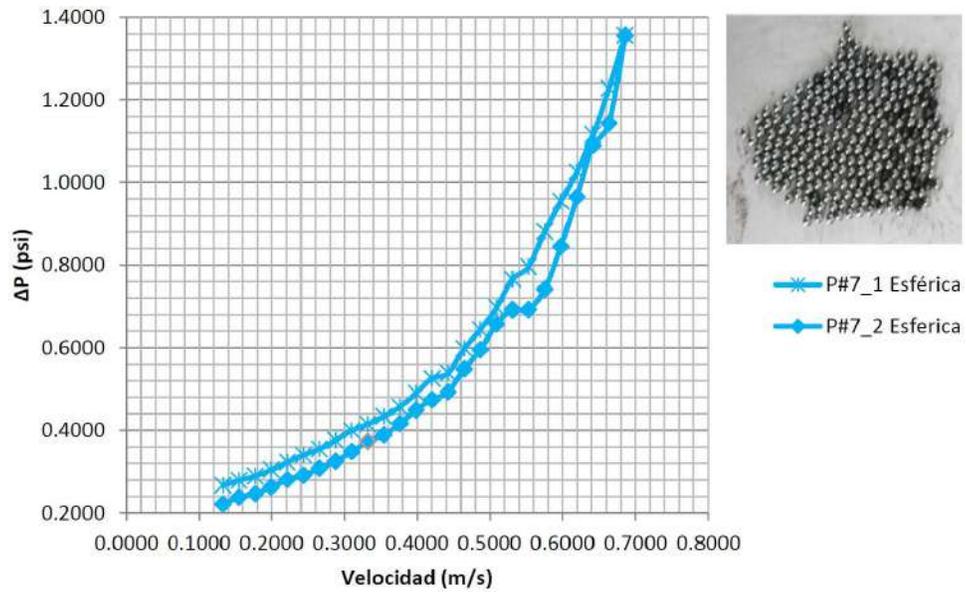


Figura 24 Caida de presión para las partículas #7 en lecho fluidizado.

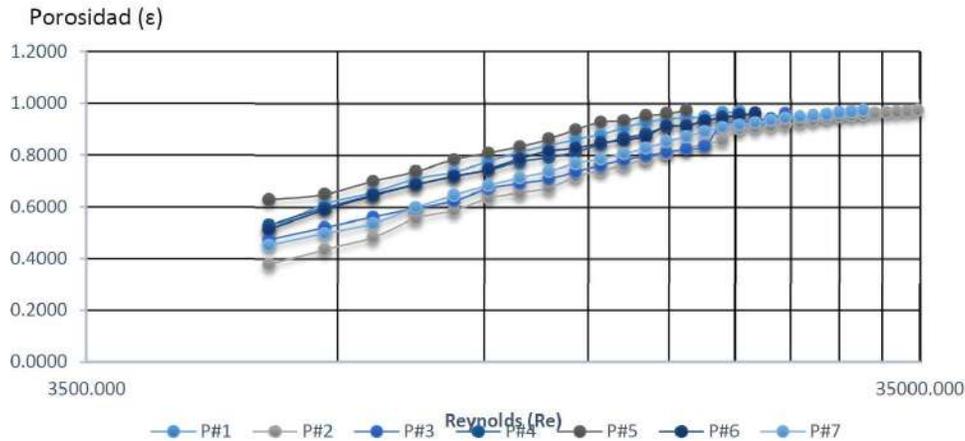


Figura 25 Desarrollo de la porosidad durante la fluidización con las diferentes partículas.

Para obtener las componentes de las velocidades dentro de cada uno de las geometrías propuestas (Figura 5) primero se intentó con un tubo de Pitot (Figura 26) pero había tanta variación en las lecturas al mínimo movimiento, por lo que se procedió mejor a calcularlas para tener un panorama más completo. Entonces se considera un flujo en estado permanente y completamente desarrollado y se procede a calcularlas mediante el software COMSOL Multiphysics con condiciones de entrada obtenidas mediante experimentación en el banco de pruebas, obteniéndose las componentes de la velocidad tangencial (V) y la velocidad axial (V_z), originándose las gráficas de la



Figura 26 Tubos Pitot desarrollados para mediciones de velocidad.

figura 27.

Tabla 1. Máxima velocidad axial y tangencial en las configuraciones probadas.

Baffles	45°	60°	75°
3	V = 0.34 (m/s) Vz = 0.54 (m/s)	V = 0.20 (m/s) Vz = 0.519 (m/s)	V = 0.20 (m/s) Vz = 0.519 (m/s)
4	V = 0.38 (m/s) Vz = 0.55 (m/s)	V = 0.23 (m/s) Vz = 0.54 (m/s)	V = 0.105 (m/s) Vz = 0.545 (m/s)
5	V = 0.35 (m/s) Vz = 0.57 (m/s)	V = 0.239 (m/s) Vz = 0.56 (m/s)	V = 0.11 (m/s) Vz = 0.565 (m/s)

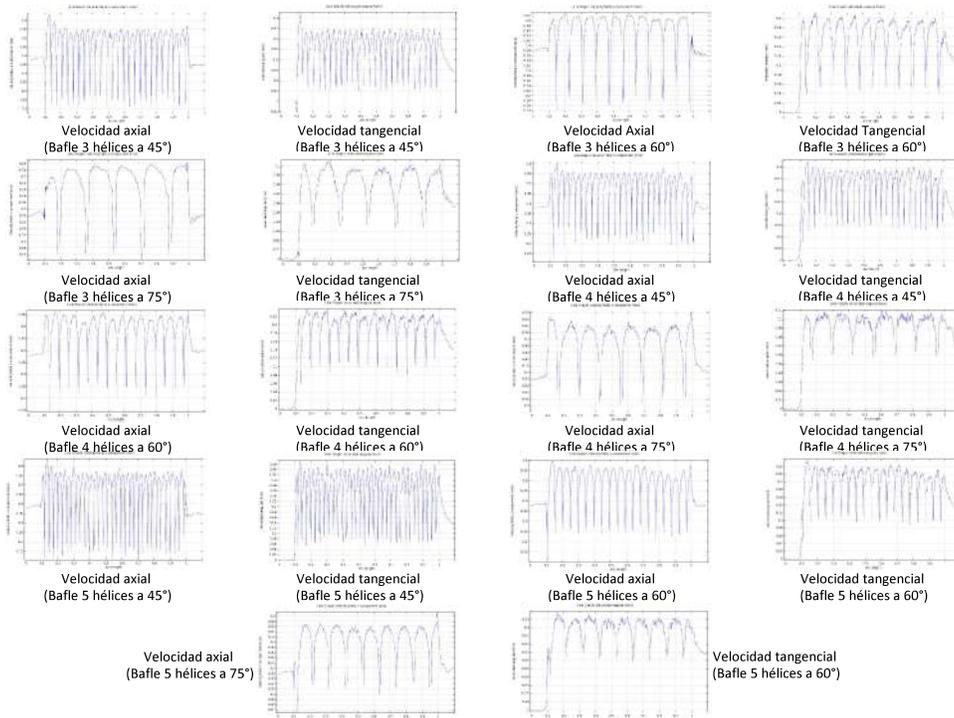


Figura 27 Velocidades tangenciales y axiales modelados .

Imágenes de las visualizaciones.

El proceso de expansión del lecho fluidizado depende en gran medida del ángulo de inclinación. En consecuencia, la velocidad crítica para el arrastre varía con el ángulo de inclinación de los baffles y presenta un máximo a aproximadamente 45°. La longitud de la columna se encontró que tenía un efecto menor sobre los fenómenos implicados³.

De acuerdo a los valores reportados en la tabla y las gráficas, se eligió a la partícula número 5 por ser la mejor para la fluidización en la columna vertical sin baffles. Por lo que se procedió a realizar las visualizaciones de la misma pero ahora con los baffles teniendo diferente número de arranques (dando canales de flujo de diferentes áreas perpendiculares al flujo), así como grados de inclinación en sus hélices, obteniéndose así



Figura 28 Baffle con 3 arranques (de izquierda a derecha) a 45°, 60° y 75°.

las imágenes que se presentan a continuación (Figuras 28, 29 y 30).



Figura 29 Baffle con 4 arranques (de izquierda a derecha) a 45° , 60° y 75° .



Figura 30 Baffle con 5 arranques (de izquierda a derecha) a 45°, 60° y 75°.

De acuerdo a los valores de velocidades e imágenes obtenidas se puede ver que las mejores configuraciones de las 9 diferentes que fueron probadas, son las de 3-45°, 4-45° y 5-60° (número de helices y ángulo de inclinación respectivamente) presentando la fluidización más homogénea en comparación con las otras, aunque en esta última configuración (5-60°) las mejores velocidades las presenta la configuración 5-45°, pero al momento de las visualizaciones se observa que al restringir la sección transversal por donde se origina la fluidización esta no es homogénea y se comienza a estancar las partículas como se puede ver en la primera imagen de la figura 30 y se obstruye el libre paso de estas mismas.

1.2 Equipo computacional y software adquirido

1.2.1 Equipo de cómputo

Para realizar las pruebas numéricas se adquirió equipo de cómputo con características especiales de procesamiento y de memoria:

Workstation Dell Precision Tower 7910 CTO

Algunas de las características importante del equipo son: 32GB de memoria, disco

duro de 2TB y 2 procesadores Intel Xeon cada uno con 12 núcleos.

1.2.2 Software

Adicionalmente al software que se tenía disponible se adquirió la versión que ofrece ANSYS para Dinámica de Fluidos Computacional

ANSYS Academic Teaching CFD

Licencia perpetua con un año de actualización y soporte

2 Resumen de resultados

2.1 Experimentales

Se han integrado los sistemas experimentales e instrumentación.

El programa experimental ha resultado en estudios de la hidrodinámica cualitativa y cuantitativa de fluidización líquido/sólido de partículas de geometrías diversas tanto en flujo vertical como en flujo helicoidal.

2.2 Modelado

El modelado se ha realizado de forma individual para:

Determinación de coeficientes de transferencia de calor considerando diferentes geometrías en deflectores, en este tema se han obtenido resultados en un proyecto terminal y material para la publicación de un artículo, quedando pendiente la comparación con datos experimentales.

Determinación de las condiciones hidrodinámicas para la fluidización de partículas con diferentes geometrías y ángulos de inclinación, el tema es parte de un proyecto de maestría y se han presentado los resultados en congresos nacionales y el proyecto está en proceso.

De igual forma se ha realizado modelado de la hidrodinámica para las modificaciones del flujo utilizado en la parte experimental, entre ellos el flujo en codos canalizados, los resultados se han presentado en un congreso nacional.

3 Publicaciones

3.1 Publicaciones:

Valaur E. Márquez-Baños, José. J. Valencia-López, Oscar García-Aranda y Christopher Heard ;(2016) "Determinación Computacional del Coeficiente de Transferencia de Calor en Calentadores Eléctricos de Flujo Continuo, mediante CFD"; INFORMACIÓN TECNOLÓGICA", 27 (5) (publicación en la última semana de octubre), (se anexa publicación y carta de publicación)

3.2 Presentaciones en congresos:

Fernando Alberto López Mata, Christopher Heard, Oscar García Aranda; José Javier Valencia López; Simulación en 2D de la Hidrodinámica de una Columna de Lechos Fluidizados; XXXVII Encuentro Nacional AMIDIQ, Puerto Vallarta; México, Mayo del 2016. (Se anexa constancia de participación y extenso del trabajo publicado en las memorias del evento)

Valaur Ekbalam Márquez Baños, Oscar García Aranda; Christopher Heard, José Javier Valencia López; Análisis CFD de Codos a 90° con Canalizadores de flujo en tuberías; XXXVII Encuentro Nacional AMIDIQ, Puerto Vallarta; México, Mayo del 2016. (Se anexa constancia de participación y extenso del trabajo publicado en las memorias del evento)

Valencia-López J. Javier; Márquez-Baños Valaur E.; Camacho-Ibarra Daniel; García- Aranda Oscar; Heard Christopher; Influencia de Factores Geométricos para la Determinación de Coeficientes de Transferencia de Calor en Intercambiadores; Trabajo extenso del 12° Congreso Interamericano de Computación Aplicado a la Industria de Procesos CAIP; Cartagena de Indias, Colombia, septiembre del 2015. (Se anexa constancia de participación y extenso del trabajo publicado en las memorias del evento)

4 Formación de Recursos humanos

Doctorado; Óscar García Aranda; "Desarrollo de intercambiadores de calor compactos con lecho fluidizado solido-líquido por el lado de la coraza"; (en proceso).

Maestría; Fernando Alberto López Mata; "Simulación de la hidrodinámica de lechos fluidizados considerando variación en el ángulo de inclinación de la columna"; (en proceso).

Licenciatura, Proyecto terminal; Daniel Camacho Ibarra; "Determinación Numérica y Comparación de Coeficientes de Transferencia de Calor bajo la influencia de Factores geométricos en Intercambiadores de Calor de Tubos Concéntricos"; mayo 2016 (en proceso).

5 Conclusiones

El proyecto tiene avances significativas integrando las disciplinas de diseño y de ingeniería y ha originado publicaciones y presentaciones que amparan dichos avances.

6 Referencias

1. G. E. Mattingly y T.T. Yeh, Report to United States Army Communications-Electronics Command Research, Development and Engineering Center, Fort Monmouth, NJ 07703 of NIST Special Tests of the Pipe Flows Produced by the Cheng Rotating Vane in Two Selected Elbow Configurations. Fluid Flow Group, Process Measurements Division, Chemical Science and Technology Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899.
http://www.chengfluid.com/yahoo_site_admin1/assets/docs/NIST_CRV_Special_Flow_Test_Report.142143754.pdf Consultado 20 de abril 2015.
2. D. Y. Cheng, Laminar flow elbow system and method, US Patent 5,323,661
3. Yakubov B., Tanny J, Maron D.M., Brauner N. The dynamics and structure of a liquid–solid fluidizedbed in inclined pipes. Chemical Engineering Journal 128 105-114 (2007)