

Calculation of fluidization velocities and pressure drop in a bubbling fluidized bed gasifier

Daniel Marcelo, Dr.¹, Waldir Bizzo, Dr.², and Ricardo García, Ing.¹

¹Universidad de Piura, Perú, daniel.marcelo@udep.pe, ricardogv15@hotmail.com

²Universidade Estadual de Campinas, Brazil, bizzo@unicamp.br

Abstract— This study aims to show the methodology and results related to the calculation of fluidization velocities in a bubbling fluidized bed gasifier. The pressure drops encountered by a fluidizing agent in the particle bed are also exposed. Velocity calculation is important because it enables a good fluidization, which induces a uniform distribution of particles. The good distribution of particles causes a uniform distribution of temperatures in the gasifier where the thermochemical reactions of the process are performed. Biomass functions as a reactor fuel, and accurate fluidization provides a summarized way for correct gasification. Good calculation of pressure drop in the bed is vital for the correctly selecting a blower, a device responsible for providing the power and airflow necessary for fluidization. The bed particles are bauxite with 86% alumina with a density of 2960 kg/m³ and an average diameter of 1.5 mm, the fluidization agent is air, and shredded leaves constitute the spent fuel.

Keywords— Biomass, energy, fluidization, gasification, methodology.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.211>
ISBN: 978-0-9993443-0-9
ISSN: 2414-6390

15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Global Partnerships for Development and Engineering Education”, 19-21 July 2017, Boca Raton FL, United States.

Cálculo de las Velocidades de Fluidización y Caída de Presión en Gasificador de Lecho Fluidizado Burbujeante

Daniel Marcelo, Dr.¹, Waldir Bizzo, Dr.², and Ricardo García, Ing.¹

¹Universidad de Piura, Perú, daniel.marcelo@udep.pe, ricardogv15@hotmail.com

²Universidade Estadual de Campinas, Brazil, bizzo@unicamp.br

Resumen— El objetivo es mostrar la metodología y resultados relacionados con el cálculo de las velocidades de fluidización en un gasificador de lecho fluidizado burbujeante. También se expone la caída de presión que sufre el agente de fluidización en el lecho de partículas.

El cálculo de las velocidades es importante, porque permite una buena fluidización lo que induce una distribución uniforme de partículas. La buena distribución de partículas provoca una distribución uniforme de temperaturas en el gasificador donde se llevan a cabo las reacciones termoquímicas del proceso.

La biomasa funciona como combustible del reactor y una correcta fluidización induce de manera resumida una correcta gasificación.

El buen cálculo de la caída de presión en el lecho es vital para la correcta elección del soplador. Este es el dispositivo encargado de proporcionar la potencia y flujo de aire necesario para la fluidización.

Las partículas del lecho son bauxita al 86% de alúmina con una densidad de 2960kg/m^3 y un diámetro medio de 1.5mm, el agente de fluidización es aire y el combustible usado son hojas trituradas de caña de azúcar.

Palabras clave—Biomasa, Energía, Fluidización, Gasificación, Metodología.

I. INTRODUCCIÓN

La gasificación es un proceso termoquímico que utiliza biomasa como combustible para la producción de un gas de síntesis de bajo poder calorífico formado por elementos volátiles como H_2 , CH_4 y otros elementos como N_2 , H_2O , CO , CO_2 y S . [1]

El porcentaje volumétrico de estos componentes varía según la biomasa a utilizar y los parámetros característicos del proceso.

La importancia de la gasificación es la reducción de contaminantes producidos por la quema directa de los residuos de algunos cultivos.

Los residuos de la cosecha de caña de azúcar como las hojas y el bagazo [2] son un gran problema porque demandan un espacio para su almacenamiento donde se crea un ambiente propicio para plagas, enfermedades y/o animales indeseados.

La solución inmediata por la que optan los agricultores y algunas empresas es la quema de las hojas de caña de azúcar [3] produciendo enfermedades respiratorias, una alta tasa de contaminación ambiental y accidentes de tránsito por la poca visibilidad que el humo genera.

Entonces, la gasificación se presenta como una tecnología importante porque utiliza residuos de cosecha como hojas de caña de azúcar, cascarilla de arroz, vaina de cacao, etc. para generar un gas de síntesis que luego podría

ser utilizado en un proceso térmico y/o eléctrico [4-5]. Así se reduce el espacio utilizado de almacenaje y se obtiene energía a partir de los desperdicios de la cosecha.

En conclusión, se permite un excelente aprovechamiento de la biomasa y se reducen los gases de efecto invernadero que produce la quema.

El trabajo descrito a continuación presenta una de las partes más laboriosas entre los cálculos de la tecnología de lecho fluidizado de gasificación y es por ello que se detalla paso a paso la metodología seguida [5].

Es importante mencionar que en la tecnología de lecho fluidizado existen los gasificador de lecho fluidizado burbujeante y por otra parte los gasificadores de lecho fluidizado circundante. Los cálculos mostrados en este artículo están referidos a un gasificador de lecho fluidizado burbujeante que trabaja con velocidades de fluidización comprendidas entre la velocidad de mínima fluidización y la velocidad terminal.

Por último, se proporcionarán los cálculos para la caída de presión en el lecho de partículas que sirven para la correcta elección del soplador o compresor, cuya potencia y flujo deben ser las necesarias para cumplir los requerimientos del proceso.

II. ANÁLISIS

A. Cálculo de las velocidades de fluidización y caída de presión en el lecho

Existen 3 velocidades de fluidización importantes en un gasificador de lecho fluidizado burbujeante [6] las cuales se detalladas a continuación.

- **Velocidad de mínima fluidización:** Es la velocidad por la cual el lecho de partículas comienza la fluidización. Se caracteriza por la vibración de algunas partículas que se encuentran en la superficie más alta del lecho. La Fig.1b muestra el estado de mínima fluidización en relación con la velocidad de mínima fluidización. Se puede apreciar que la altura del lecho aumenta un aproximado de 1.25 veces la altura del lecho estático tal como muestra la bibliografía [6] y las pruebas experimentales.
- **Velocidad de fluidización:** No tiene precisamente un valor fijo, sino que son aquellas velocidades en la cuales las partículas se mueven sin trayectoria definida. Los rangos de valores que toman las

velocidades de fluidización se encuentran comprendidos entre la velocidad de mínima fluidización y la velocidad terminal. La Fig.1d muestra el estado de fluidización burbujeante ideal del lecho en relación a una velocidad de fluidización ideal. Se puede notar que la altura del lecho no aumenta significativamente en relación al estado de mínima fluidización cuando se usa gas como agente fluidizante, como es el caso del trabajo aquí presentado.

- **Velocidad terminal:** Es aquella velocidad que causaría que las partículas se desborden del reactor llegando a chocar la tapa donde se encuentra el visor y/o pasando por el ducto que lleva al ciclón. El comportamiento del lecho para esta velocidad quedaría representado por la Fig. 1h.

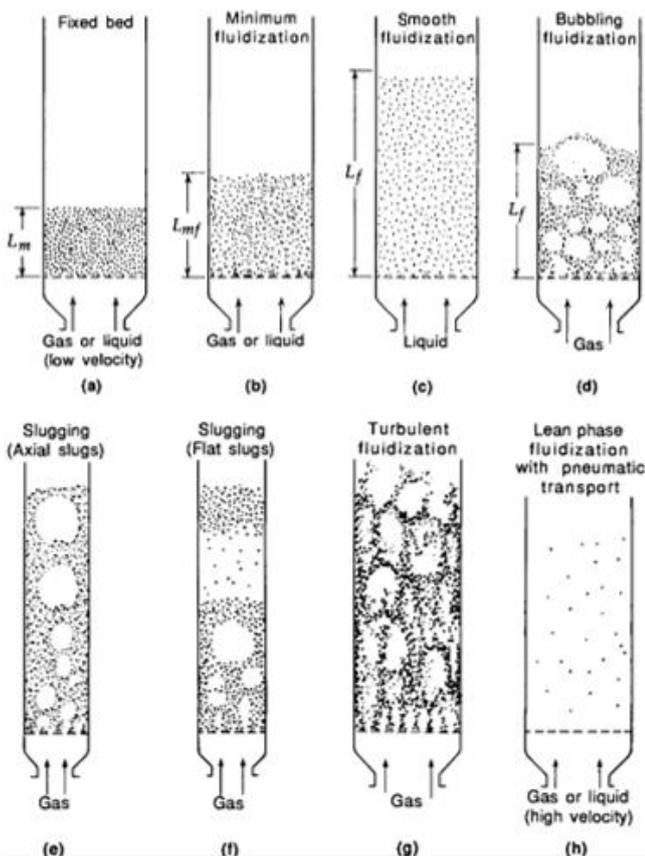


Fig. 1: Estados de fluidización dentro de un reactor de gasificación

Para el cálculo de las velocidades de mínima fluidización, y la velocidad terminal será necesario de la simbología mostrada en la tabla 1.

TABLA 1
SIMBOLOGÍA DE CÁLCULO

SIMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDAD
ΔP	Caída de presión del gas a través del lecho ¹	[Pa]
H	Altura del lecho en condiciones de fluidización	[m]
H_{mf}	Altura del lecho en mínima fluidización	[m]
A_g	Área de sección transversal del reactor a la altura del lecho	[m ²]
ϵ_{mf}	Porosidad del material del lecho en mínima fluidización	[adimensional]
ρ_s	Densidad de las partículas inertes	[kg/m ³]
ρ_g	Densidad del gas de fluidización (aire)	[kg/m ³]
g	Aceleración de la gravedad	$\frac{m}{s^2}$
H_f	Altura del lecho en lecho estacionario	[m]
ϵ_f	Porosidad del material inerte del lecho estacionario	[m]
μ_g	Viscosidad dinámica del gas de fluidización (aire).	[Pa * s]
v_{sg}	Velocidad superficial del gas de fluidización	[m/s]
d_p	Diámetro de la partícula	[m]
ϕ	Esfericidad de las partículas del lecho (arena)	Adimensional
Re_p	Número de Reynolds de la partícula en mínima fluidización	Adimensional
Ar_{sf}	Número de Arquímedes para el sistema sólido-fluido	Adimensional
v_{mf}	Velocidad de mínima fluidización	[m/s]
Re	Número de Reynolds	Adimensional
D	Diámetro de la tubería por la cual circula un fluido o longitud característica del sistema	[m]
ρ	Densidad del fluido	[kg/m ³]
v	Velocidad del fluido	m/s
μ	Viscosidad dinámica del fluido	[Pa * s]
L	Longitud característica de un cuerpo	m
ρ_l	Densidad del fluido	[kg/m ³]
ρ	Densidad del cuerpo	[kg/m ³]
v_t	Velocidad terminal	m/s

Para continuar con las ecuaciones y la metodología de dimensionamiento [1] serán necesarios los parámetros iniciales mostrados en la tabla 2.

¹ Al hablar de lecho se hace referencia a las partículas inertes sobre la placa distribuidora

TABLA 2
DATOS INICIALES

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	BIBLIOGRAFÍA
Diámetro medio [m]	d_p	0.0015	Clasificación por malla N°16
Esfericidad de la partícula [Adimensional]	ϕ	0.596	Calculada posteriormente
Porosidad en condiciones de mínima fluidización [Adimensional]	ε_{mf}	0.475	Calculado posteriormente
Porosidad en lecho fijo [Adimensional]	ε_f	0.4	SANTA y D'AVILA (1986)
Densidad del material del lecho [kg/m ³]	ρ_s	2960	Dato de proveedor
Densidad del gas de fluidización a la temperatura del gasificador. [kg/m ³]	ρ_g	0.3289	Tablas de termodinámica
Aceleración de la gravedad [m/s ²]	g	9.81	Dato universal
Viscosidad dinámica del gas de fluidización a la temperatura del gasificador [Pa * s]	μ_g	4.362*10 ⁻⁵	Tablas de termodinámica

La metodología de diseño se presenta a continuación [7]. Primero se halla la velocidad de mínima fluidización, luego la velocidad terminal y por último la caída de presión en el lecho.

Matemáticamente y para fines de ingeniería se puede decir que la fluidización comienza cuando el peso de las partículas del material presente en el lecho se equilibra con la fuerza de arrastre del gas en movimiento.

La expresión que resulta de la definición anterior es dada por la ecuación 1:

$$\Delta P * A_g = A_g * H_{mf} * (1 - \varepsilon_{mf}) * (\rho_s - \rho_g) * g \quad (1)$$

Debido a que en condiciones de mínima fluidización el área en el reactor se mantiene constante se puede simplificar la ecuación 1 resultando la ecuación 2 y ordenando términos se puede obtener la ecuación 3.

$$\Delta P = H_{mf} * (1 - \varepsilon_{mf}) * (\rho_s - \rho_g) * g \quad (2)$$

$$\frac{\Delta P}{H_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) * (\rho_s - \rho_g) * g \quad (3)$$

Por otra parte, el turco ingeniero químico Sabri Ergun desarrollo en 1952 una ecuación que describe la caída de presión en un lecho fijo, es decir en un lecho estacionario sin fluidización. La ecuación vale para partículas no esféricas de igual tamaño y se rige siguiendo la ecuación 4

$$\frac{\Delta P}{H_f} \cong 150 * \frac{(1 - \varepsilon_f)^2}{\varepsilon_f^3} * \frac{\mu_g * v_{sg}}{(\phi * d_{pe})^2} + 1.75 * \frac{(1 - \varepsilon_f) * (\rho_g) * (v_{sg})^2}{\varepsilon_f^3 * (\phi * d_{pe})} \quad (4)$$

Al no tener partículas totalmente esféricas ni de igual tamaño se debe reemplazar en la ecuación 4 el símbolo d_{pe} por su equivalente d_p que al sustituir queda según lo indicado en la ecuación 5.

$$\frac{\Delta P}{H_f} \cong 150 * \frac{(1 - \varepsilon_f)^2}{\varepsilon_f^3} * \frac{\mu_g * v_{sg}}{(\phi * d_p)^2} + 1.75 * \frac{(1 - \varepsilon_f) * (\rho_g) * (v_{sg})^2}{\varepsilon_f^3 * (\phi * d_p)} \quad (5)$$

Se puede igualar las fórmulas 3 y 5 al considerar que la altura de fluidización no cambia significativamente respecto a la altura de mínima fluidización tal como se mostró en la Fig. 1.

El resultado de esta igualdad se muestra en la ecuación 6.

$$\frac{1.75}{(\phi * \varepsilon_{mf}^3)} * \left[\frac{d_p * v_{mf} * \rho_g}{\mu_g} \right]^2 + \frac{150 * (1 - \varepsilon_{mf}) * d_p * v_{mf} * \rho_g}{\phi^2 * \mu_g * \varepsilon_{mf}^3} = \frac{d_p^3 * \rho_g * (\rho_s - \rho_g) * g}{\mu_g^2} \quad (6)$$

Se debe tener en cuenta que el número de Reynolds define la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, mientras el número de Arquímedes relaciona las fuerzas gravitatorias y las fuerzas viscosas según las ecuaciones 7 y 8 respectivamente.

De esta manera se reduce la ecuación 6 en la ecuación 9

$$Re = \left[\frac{D * v * \rho}{\mu} \right] \quad (7)$$

$$Ar_{sf} = \frac{L^3 * \rho_l * (\rho - \rho_l) * g}{\mu^2} \quad (8)$$

$$k_1 * Re_p^2 + k_2 * Re_p = Ar_{sf} \quad (9)$$

Donde:

$$Re_p = \left[\frac{d_p * v_{mf} * \rho_g}{\mu_g} \right]$$

$$Ar_{sf} = \frac{d_p^3 * \rho_g * (\rho_s - \rho_g) * g}{\mu_g^2}$$

$$k_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 * \phi}$$

$$k_2 = \frac{150 * (1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 * \phi^2}$$

Con pruebas experimentales en un lecho fijo de 14cm de altura ($H_f = 14$) con porosidad $\varepsilon_f = 0.4$ se puede observar que el estado de mínima fluidización alcanza 16cm de altura ($H_{mf} = 16$).

Haciendo uso de la ecuación 10 la porosidad en mínima fluidización resulta ser de 0.475 ($\varepsilon_{mf} = 0.475$).

$$H_{mf} = \left(\frac{1 - \varepsilon_f}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) * H_f \quad (10)$$

Kunii y Levenspiel (1991) [6] indican que puede ser utilizada la tabla 3 con las relaciones de k_1 y k_2 para hallar el valor de esfericidad de las partículas. Los resultados se muestran en la tabla 4 siendo la esfericidad de $\phi = 0.596$ la que ofrece el menor error.

TABLA 3
VALORES QUE RELACIONAN k_1 Y k_2

INVESTIGADORES	PRIMERA RELACIÓN $k_2/2 * k_1$	SEGUNDA RELACIÓN $1/k_1$
Wen and Yu (1966)	33.7	0.0408
Richardson (1971)	25.7	0.0365
Saxena and Vogel (1977)	25.3	0.0571
Babu et al. (1978)	25.3	0.0651
Grace (1982)	27.2	0.0408
Chitester et al. (1984)	28.7	0.0494

TABLA 4
VALORES DE ESFERICIDAD

FUENTE	PRIMERA RELACIÓN		SEGUNDA RELACIÓN		ERROR 1 [%] ²	ERROR 2 [%] ³
	valor	ϕ	valor	ϕ		
Wen and Yu (1966)	33.7	0.34	0.0408	0.666	95.63	48.88
Richardson (1971)	25.7	0.446	0.0365	0.596	33.46	25.07
Saxena and Vogel (1977)	25.3	0.454	0.0571	0.932	105.55	51.35
Babu et al. (1978)	25.3	0.454	0.0651	1.063	134.3	57.33
Grace (1982)	27.2	0.422	0.0408	0.666	57.9	36.67
Chitester et al. (1984)	28.7	0.4	0.0494	0.807	101.7	50.43

Por último, la velocidad de mínima fluidización queda definida según la ecuación 11

$$v_{mf} = Re_p * \frac{\mu_g}{d_p * \rho_g} \quad (11)$$

Muchos autores presentan distintas metodologías para calcular la velocidad terminal. Algunas más complicadas que otras y con mayor exactitud.

Sin embargo, para los objetivos del presente trabajo se trabaja con la metodología reportada por Haider y Levenspiel (1989) [7] cuyos resultados fueron reportados por otros investigadores y están dentro de los rangos aceptables. Esto se puede comprobar a través de la diferente bibliografía consultada.

A continuación, se presenta las ecuaciones que gobiernan esta metodología.

$$d_p^* = d_p * \left[\rho_g * (\rho_s - \rho_g) * \frac{g}{\mu_g^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

$$v_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744 * \phi}{(d_p^*)^{0.5}} \right]^{-1} \quad (13)$$

² Considera como valor exacto el resultado de la primera relación

$$v_t = v_t^* * \left[\mu_g * (\rho_s - \rho_g) * \frac{g}{\rho_g^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

Por último, la caída de presión en el reactor, en un lecho de partículas está definida por la ecuación 15.

$$\Delta P = H_f * (1 - \epsilon_f) * (\rho_s - \rho_g) * g \quad (15)$$

A partir de la ecuación 15 se pudo calcular la caída de presión. El resultado es de 9.15kPa para lecho fijo de 525mm que es lo recomendable a usar como altura de lecho fijo.

El resumen de los resultados se muestra en la tabla 5

TABLA 5
RESUMEN DE RESULTADOS

SIMBOLO	SIGNIFICADO	VALOR
Re_p	Número de Reynolds de la partícula en mínima fluidización	7.4528
v_{mf}	Velocidad de mínima fluidización	0.66[m/s]
v_t	Velocidad terminal	8.025[m/s]
ΔP	Caída de presión del gas a través del lecho para 14mm de lecho fijo	2.44[kPa]
ΔP	Caída de presión del gas a través del lecho para 525mm de lecho fijo	9.15[kPa]

III. CONCLUSIONES

La fluidización y un buen cálculo de las velocidades de fluidización son importantes en el proceso de gasificación, porque provocan que las partículas de bauxita depositadas en el lecho del reactor se pongan en contacto con la biomasa distribuyéndola por toda la sección transversal del gasificador. Esto provoca una distribución uniforme de temperaturas y ayuda a que la conversión de biomasa sea más eficiente.

Tener claro los regímenes de fluidización, las velocidades de fluidización y las alturas de la cama de lecho correspondiente a estas velocidades, implica conocer bien el proceso y poder realizar con éxito los cálculos de potencia del soplador y la placa distribuidora.

Para un gasificador en lecho fluidizado burbujeante no se puede superar la velocidad terminal ni presentarse un estado neumático de funcionamiento.

El material del lecho a su vez juega un papel importante en la fluidización y en la conversión de las hojas de caña en un gas de síntesis. Influye en la difusión de la masa, el flujo de aire y principalmente en la pérdida de carga. Su elección puede tratarse según las partículas de Geldart. Es de mucha importancia conocer el diámetro medio de las partículas, la esfericidad, la densidad y la porosidad en lecho fijo.

Como un antecedente del presente trabajo se recogió información de Olivares Gómez (1996) donde el material inerte era alúmina tipo grano 46 de $1760 kg/m^3$ y diámetro medio de 0.379mm, pero su difícil y costosa adquisición

³ Considera como valor exacto el resultado de la segunda relación

provocó trabajar y realizar cálculos con un nuevo material llamado bauxita al 86% de alúmina de densidad de $2960\text{kg}/\text{m}^3$ y diámetro medio de 1.5mm lo que según la clasificación de las partículas de Geldart se encuentra en el grupo D.

La caída de presión en el gasificador se calculó en 12.77kPa para una altura de 525mm de lecho fijo. Los 12.77kPa son la suma de la caída de presión en el lecho, en el ciclón y en la placa distribuidora. La caída de presión trabajada en este artículo es la que se da en la cama del lecho de bauxita porque es la causante de la caída de presión más significativa con un valor de 9.15kPa. Existe también una caída de presión en el ciclón de 0.8538kPa y una caída de presión en la placa distribuidora de 0.4734kPa.

Como se puede observar el lecho de material inerte es el causante de la mayor parte de la caída de presión en un reactor de gasificación en lecho fluidizante por ello se decidió mostrar paso a paso la metodología de cálculo.

Es bueno considerar un factor de seguridad de 1.5 para tener en cuenta las caídas de presión por fricción, tuberías y accesorios, resultando un aproximado de 20kPa para 525mm de altura de lecho fijo.

Al considerar un factor de seguridad entre 1.5-2 para la caída de presión en el lecho puede ser irrelevante los cálculos de la caída de presión en el ciclón y en la placa distribuidora.

Se ha logrado hallar las velocidades de fluidización más importantes para el proceso y se ha desarrollado en Matlab una metodología de cálculo basada en las diferentes investigaciones. Los resultados, tanto de velocidades como caída de presión son satisfactorios y han sido comprobados al compararlos con los resultados de otros autores. En la Universidad de Piura se tiene la construcción y montaje completo de toda una planta piloto para pruebas experimentales de gasificación. También se ha realizado pruebas que validan cada equipo permitiendo elaborar un protocolo de arranque exitoso.

La fluidización es un proceso muy importante dentro del gasificador, autores incluso usan la dinámica computacional para realizar simulaciones numéricas que ayuden a comprender y visualizar cómo se comportará un lecho de partículas inertes en contacto con una corriente de aire ascendente [8].

RECONOCIMIENTOS

Los investigadores manifiestan su agradecimiento a Fondecyt – Concytec por el financiamiento del proyecto N° 130-2015-FONDECYT, “IDENTIFICACIÓN NERGÉTICA DE LA PRODUCCIÓN DE SYNGAS UTILIZANDO UN GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO DE DIFERENTES TIPOS DE RESIDUOS DE BIOMASA CON FINES DE APROVECHAMIENTO TÉRMICO O ELÉCTRICO” y a la UNIVERSIDAD DE PIURA por el apoyo que sus instalaciones han brindado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. A. Estrada y A. Zapata Meneses, «Gasificación de Biomasa para la Producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor,» Holanda, 2004, pp. 155-159.
- [2] I. de Carvalho Macedo, M. M. Lima Verde Leal and S. J. Hassuani, "Sugar cane residues for power generation in the sugar/ethanol mills in Brazil," Brazil, S. Rajagopalan, 25/5, Borebank Road, 2001, pp. 77-82.
- [3] J. Werther, M. Saenger, E. Hartge, T. Ogada and Z. Siagi, "Combustion of agricultural residues," Elsevier, pp. 1-27, 2000.
- [4] R. M. Jorapur and A. K. Rajvanshi, "Development of a sugarcane leaf gasifier for electricity generation," Elsevier, vol. 8, no. 2, pp. 91-98, 1995.
- [5] R. Jorapur and A. K. Rajvanshi, "Sugarcane leaf-bagasse gasifiers for industrial heating applications," Elsevier, vol. 13, no. 3, pp. 141-146, 1997.
- [6] D. Kunii and O. Levenspiel, Fluidization Engineering, 2 ed., 1991.
- [7] E. Olivares Gómez, «Proyecto, construcción y validación preliminar de un reactor de lecho fluidizado para gasificación de bagazo de caña de azúcar,» Sao Paulo, 1996, pp. 66-72.
- [8] Á. Sánchez Gómez, Caracterización de los regímenes de fluidización en un lecho fluido bidimensional mediante simulaciones multifásicas, Madrid, España, 2012.