

# ANÁLISIS OPERATIVO DE UN GASIFICADOR DOWNDRAFT DE RESIDUO MADERABLE

## Operational analysis of a downdraft gasifier for wood residues

MsC. Nairo J. Rodriguez B <sup>1</sup>

Erika M. Plazas M <sup>2</sup>

narodriguezb@sena.edu.co

emplazas@sena.edu.co

<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-8471-1579, Centro CIMM, Grupo GICAB -Regional Boyacá, Sogamoso, Colombia

<sup>2</sup> ORCID 0000-0002-4210-6159, Centro CIMM, Grupo GICAB -Regional Boyacá, Sogamoso, Colombia

**Resumen:** La gasificación es un proceso de oxidación de la biomasa a través de un proceso termoquímico el cual la descompone en un gas de síntesis (SYNGAS), este tiene unas propiedades térmicas que permiten su utilización como fuente de energía, específicamente su versatilidad da la opción de inyección a un motor de combustión para generación de energía eléctrica. El alcance del estudio está limitado a la operación de un gasificador downdraft de 30 kW con capacidad volumétrica de  $0.5 \text{ m}^3$  aprovechando residuos maderables, el objetivo está orientado a identificar el punto óptimo de operación bajo la caracterización y correlación de variables (velocidad de entrada de aire y temperatura combustión en el reactor). En términos generales se busca identificar el punto óptimo de operación para definir protocolos operativos del gasificador pensando en el escalamiento de la tecnología al sector aserradero de la provincia del sugamuxi. De igual manera se analiza indicadores termoeconómicos que soportan la tecnología como alternativa energética para aplicación en procesos productivos.

**Palabras Clave:** Biomasa, escalamiento tecnológico, gasificación, Syngas, termoeconómico.

### Abstract:

Gasification is a biomass oxidation process through a thermochemical process which decomposes it into a synthesis gas (SYNGAS), this has thermal properties that allow its use as an energy source, specifically its versatility gives the option of injection into a combustion engine to generate electrical energy. The scope of the study is limited to the operation of a 30 kW downdraft gasifier with a volumetric capacity of  $0.5 \text{ m}^3$  taking advantage of wood residues, the objective is aimed at identifying the optimum point of operation under the characterization and correlation of variables (Speed of air inlet and combustion temperature in the reactor). In general terms, the aim is to identify the optimal point of operation to define operational protocols for the gasifier, considering the scaling of the technology to the sawmill sector of the province of Sugamuxi. In the same way, thermoeconomic indicators that support technology as an energy alternative for application in production processes are analyzed.

**Keywords:** Biomass, technological scaling, gasification, Syngas, thermoeconomics.

## I. INTRODUCCIÓN

La gasificación es una tecnología de conversión de residuos en energía. Toma materias primas de desecho y

aplica calor, oxígeno y presión para convertirlas en un gas de síntesis a través de un gasificador que esencialmente es un reactor termoquímico donde tienen lugar varios procesos físicos y químicos complejos [1]. Actualmente existen diferentes tipos de gasificadores Lecho fijo, lecho fluidizado, flujo volante, baño férrico. Específicamente el gasificador downdraft está caracterizado como un gasificador de lecho fijo, son de uso común para la generación de bajas potencias eléctricas ( $< 500 \text{ kWe}$ ) debido a que producen un gas pobre más limpio (menor cantidad de alquitranes), aspecto que facilita el proceso de acondicionamiento y limpieza previa a su uso en motores de combustión interna [2]. Una de las ventajas de la tecnología de gasificación es que optimiza el aprovechamiento energético de la biomasa, permitiendo implementarla en el mismo lugar en el que se genera los residuos maderables, disminuyendo los costos de almacenamiento y transporte [3].

A pesar de que en el mundo se ha desarrollado la tecnología de gasificación de lecho fijo de co-corriente a nivel comercial, en la bibliografía publicada hay información limitada en cuanto al diseño óptimo de los sistemas auxiliares de los gasificadores, que permita desarrollar sistemas de aprovechamiento energético de biomasa más eficientes. En [4] se presenta el diseño de un equipo de gasificación que inició con la caracterización de los residuos de cosecha de caña, teniendo en cuenta las propiedades físicas y modelos cinéticos. Posteriormente definieron parámetros de operación necesarios para el diseño del reactor, diseño del sistema de alimentación de biomasa y de aire, sistema de extracción de cenizas, sistema de extracción de gases y el control operativo.

Actualmente se vienen trabajando en el aprovechamiento de diferentes residuos orgánicos, en [5] se presentan los estudios paramétricos sobre la gasificación de la tusa: relación de equivalencia, producción específica de gas y rendimiento en frío del gasificador. Los resultados muestran que en los gasificadores de lecho fijo la composición del gas producto de la gasificación de la tusa con aire presenta los siguientes valores  $\text{CO}$  (9.42-27.00% vol.),  $\text{H}_2$  (4.50-20.00% vol.),  $\text{CH}_4$  (1.54-2.80% vol.),  $\text{CO}_2$  (7.40-17.99% vol.),  $\text{N}_2$  (50.00-65.85% vol.),  $\text{O}_2$  (0.00-1.61% vol.), hidrocarburos leves

(1.54-2.80% vol.), CO<sub>2</sub> (7.4017.99% vol.), N<sub>2</sub> (50.00-65.85% vol.), O<sub>2</sub> (0.00-1.61% vol.), hidrocarburos leves (0.050,39% vol.), el poder calorífico del gas entre 4-6 MJ / Nm<sup>3</sup> y el rendimiento en frío de los gasificadores entre 60-70%, [5].

En otros estudios se analizan los efectos de la tasa de flujo de aire y el contenido de humedad en la tasa de consumo de biomasa y la calidad del gas productor generado. El rendimiento del sistema de gasificación de biomasa se evalúa en términos de relación de equivalencia, composición del gas productor, su valor calorífico, tasa de producción y temperaturas de zona y eficiencia del gas frío [6].

El modelado como herramienta de análisis permite simular el proceso de producción de un syngas. Considerando las etapas de pretratamiento y acondicionamiento de la biomasa (secado, torrefacción y molienda), gasificación en lecho arrastrado, limpieza y acondicionamiento del syngas producido, y ajuste de la relación H<sub>2</sub>/CO, adicionalmente se modela la Unidad de Separación de Aire (ASU) para la producción de oxígeno como agente gasificante, a la vez concluyeron que el modelo desarrollado, es una herramienta computacional útil para realizar análisis de sensibilidad en procesos de producción de biocombustibles líquidos y/o productos químicos a partir de gasificación de biomasa en lecho arrastrado [7].

El modelamiento matemático también ha permitido definir un estudio detallado de variables basado en parámetros de entrada típicos en la gasificación como el análisis elemental de la biomasa, la humedad, la relación de equivalencia y que adicionalmente incorpora la relación de reacción con aire [8]. Además, se plantearon balances de masa y energía, ecuaciones de equilibrio para predecir la composición de salida de los gases, temperatura y poder calorífico del gas producido. Todo esto para un gasificador de lecho fijo equicorriente "Downdraft", considerado en estado estacionario. Los resultados fueron comparados con datos experimentales de gasificadores reportados en la literatura y arrojaron resultados aceptables.

El aprovechamiento de diferentes residuos maderables ha llevado al desarrollo de gasificadores que funcionen con aserrín. Es el caso de un trabajo que trata de la simulación computacional de un gasificador de residuos de madera de aserrín utilizando un sistema de equilibrio basado en la minimización de la energía libre de Gibbs. El gasificador ha sido probado con aserrín de *Pinus Elliotis*, una especie exótica ampliamente cultivada en el sur de Brasil. La biomasa utilizada en las pruebas presentaba una humedad cercana al 10% (wt% en base húmeda), y los resultados de la composición media del gas producido (sin alquitrán) son comparados con los estados de equilibrio utilizados. Se elaboraron modelos más complejos para reproducir con mayor precisión el gasificador estudiado. Aunque estos no representan muy bien las reacciones que se producen a temperaturas relativamente altas (800 °C), [9]. El modelado puede ser útil para mostrar algunas tendencias en las variaciones de los parámetros de trabajo de un gasificador [9].

La planta de gasificación en estudio consta de un

gasificador de 1,5 m de altura y 0,35 m de diámetro interior, sistema de filtrado y acondicionamiento del gas pobre, más un ventilador con un motor de 280 w. Las características operativas del gasificador, capacidad de carga del reactor y velocidad de entrada de aire definen el análisis de variables que se presenta en el desarrollo experimental.

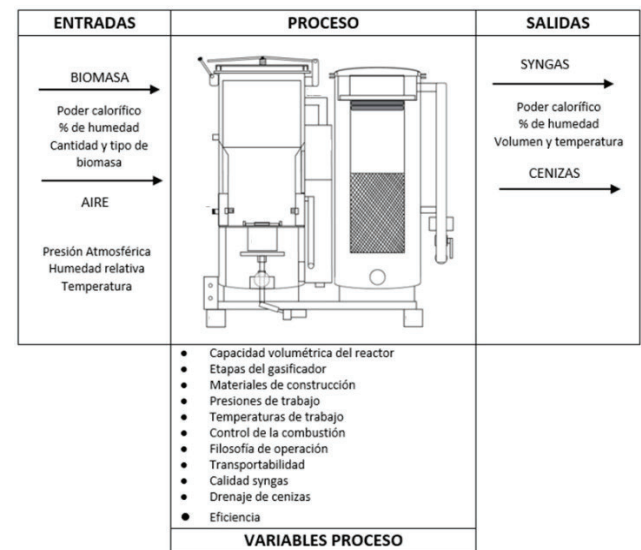
## II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La planta de gasificación descrita anteriormente se analizó bajo un diseño experimental de variables unifactorial que permitió correlacionar un factor de control con tres niveles y una variable de respuesta.

### A. Identificación de variables

La identificación de las variables se ajustó según la condición de diseño y fabricación del gasificador downdraft fig. 1. Teniendo presente todas las variables de entrada de proceso y salidas que intervienen en el gasificador.

Figura 1. Identificación de variables de un gasificador Downdraft.



Fuente Autores

Para definir las variables de control dentro del análisis experimental unifactorial, se caracterizaron y bloquearon las siguientes variables:

### B. Variables de entrada

Se realizó una caracterización de la biomasa, las Condiciones Ambientales, la Entrada de aire y la Temperatura de combustión, en las cuales se introdujeron cambios deliberados en las variables de entrada que forman el proceso, de manera que fuera posible identificar las causas de los cambios en la variable de respuesta.

**Tipo de biomasa:** El proceso de gasificación se realizó con residuo maderable de pino y eucalipto con porcentajes de humedad entre el 10% y 15%, capacidad de carga del reactor de combustión de 10kg, foto 1.

Foto 1. Delimitación de peso por carga para el reactor



Fuente Autores

Las condiciones dimensionales de la biomasa se realizaron ajustado a recomendaciones bibliográficas promedio de 10 cm, la caracterización dimensional se realizó bajo un muestreo estratificado, foto 2.

Foto 2. Caracterización Dimensional del residuo Maderable



Fuente autores

**Condiciones Ambientales:** Las pruebas se realizaron en el SENA Centro Industrial de Mantenimiento y Manufactura de Sogamoso, el cual se encuentra ubicado a 2569 msnm, las condiciones de pruebas se realizaron en condiciones ambientales de tiempo seco, pero en temporada de lluvia con humedades relativas del 50 % y temperatura ambiental promedio de 18°C.

**Entrada de aire:** La entrada del aire es una variable sensible para la operación del gasificador, ya que de esta variable depende la condición de degradación de la biomasa en la zona de pirolisis, el control de la entrada del aire se definió según la capacidad de tiro del soplador y la regulación de apertura de la válvula de bola. En la tabla 1 se muestra la parametrización entre apertura de válvula y velocidad de entrada del aire.

Tabla 1. Correlación entre apertura de válvula y velocidad de entrada

Apertura de válvula %	Velocidad entrada del aire m/s
100	6
80	5
60	4

Fuente autores

**Temperatura de combustión:** La temperatura en el reactor depende directamente de la cantidad de aire que se inyecte en

el proceso de combustión, se planteó la hipótesis: A menor cantidad de aire suministrado en la zona de pirolisis, la temperatura debe decaer. Por lo tanto, el objetivo del estudio se centró en identificar el punto óptimo de suministro aire en la zona de pirolisis que permita un proceso de gasificación óptimo. El registro de la temperatura se realizó con una termocupla tipo k con capacidad máxima de registro de 1300 °C y se visualizó en un controlador de temperatura foto 3.

Foto 3. Sistema de registro de temperatura en reactor



Fuente autores

Teniendo en cuenta las variables analizadas y el objetivo del estudio, se determinó que la variable de entrada estaría ajustada por la velocidad de aire suministrado al gasificador y como respuesta la temperatura de registro en la cámara de combustión.

### C. Diseño experimental

En la tabla 2 se resumen el diseño experimental, definiendo tres niveles para la variable de entrada (Velocidad de entrada del aire) y 6 observaciones en la variable de respuesta por nivel (Temperatura de combustión °C), lo que define un total de 18 observaciones.

Tabla 2. Diseño experimental Unifactorial

N	V	R	Temperatura de combustión °C OBSERVACIONES					
1	6	Y <sub>1</sub>	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>13</sub>	Y <sub>14</sub>	Y <sub>15</sub>	Y <sub>16</sub>
2	5	Y <sub>2</sub>	Y <sub>21</sub>	Y <sub>22</sub>	Y <sub>23</sub>	Y <sub>24</sub>	Y <sub>25</sub>	Y <sub>26</sub>
3	4	Y <sub>3</sub>	Y <sub>31</sub>	Y <sub>32</sub>	Y <sub>33</sub>	Y <sub>34</sub>	Y <sub>35</sub>	Y <sub>36</sub>

N: Niveles

V: Velocidad entrada aire m/s

R: Respuesta

Fuente autores

El problema mostrado en la tabla 1 esta ajustado por un diseño experimental Unifactorial

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde

$$y_{ij} = \text{Variable de respuesta}$$

$\mu_i$  = el valor medio de las observacion

$\varepsilon_{ij}$  = Error aleatorio en las observaciones

Se plantearon dos hipótesis (Nula o Alterna)

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

$$H_1 = \mu_i \neq \mu_j \text{ (para al menos un par)}$$

y esto es equivalente a

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a$$

$$H_1 = \tau_i \neq 0 \quad \exists_i$$

Para determinar si cualquiera de las diferencias entre las medias es estadísticamente significativa, se comparó el valor p con el nivel de significancia con el fin de evaluar la hipótesis nula. El nivel de significancia se definió en 0.05 indicando un riesgo de 5% de concluir que existe una diferencia cuando no hay una diferencia real.

### III. RESULTADOS

Los datos registrados en las pruebas del gasificador se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados pruebas experimentales

N	V	R	Temperatura de combustión °C					
OBSERVACIONES								
1	6	$Y_1$	998	1010	1040	1005	1060	1040
2	5	$Y_2$	950	970	985	990	945	1003
3	4	$Y_3$	970	950	945	960	930	920

N: Niveles

V: Velocidad entrada aire m/s

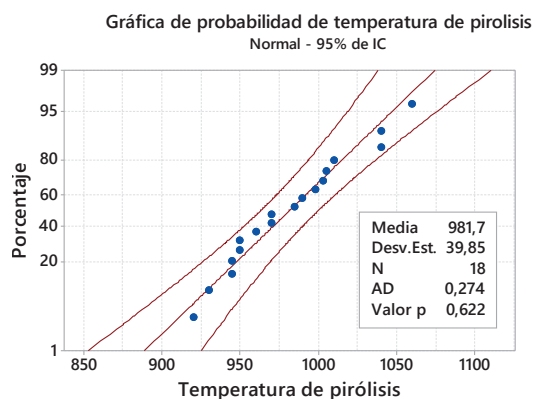
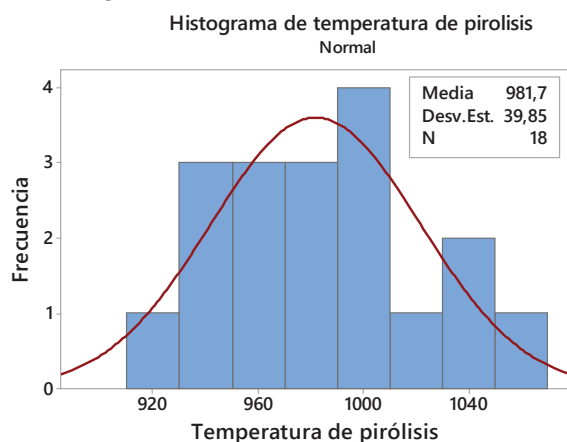
R: Respuesta

Fuente Autores

#### A. Los análisis de normalidad

Los datos de las observaciones (temperatura de combustión °C) registrados en la tabla 3 se analizan bajo pruebas paramétricas de contraste de hipótesis con el fin de identificar que sigan una distribución normal y así poder diferir la distribución de los datos observados respecto a lo esperado si procediesen de una distribución normal con la misma media y desviación típica. En la figura 2 se puede observar que la tendencia de los datos se ajusta a una distribución normal, se toma como referencia el valor del dato AD (Anderson Darling) el cual es mayor al valor de significancia  $\alpha=0.05$ , en este caso  $AD=0.274$ , la correlación de los valores anteriores permite confirmar la normalidad de los datos.

Figura 2. Análisis de normalidad de datos



Fuente autores

#### B. Análisis de Varianza (ANOVA) unidireccional: temperatura de pirólisis vs. velocidad de entrada

Con la certeza que los datos recolectados siguen una tendencia de normalidad se procedió a realizar un análisis de varianza Anova bajo los siguientes parámetros

Hipótesis nula: Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna: Por lo menos una media es diferente

Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

Se verificó mediante la prueba de Levene la igualdad de varianzas, condición estadística necesaria para el análisis de varianza ANOVA.

En la tabla 4. Se muestran los resultados del análisis Anova de los datos registrados en la experimentación.

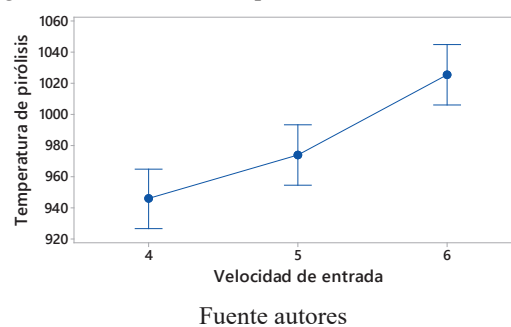
Tabla 4. Análisis de Varianza (Anova)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Velocidad de entrada	2	19600	9800,2	19,87	0,000
Error	15	7399	493,2		
Total	17	27000			

Fuente Autores

El P-valor es inferior al valor de significancia  $\alpha = 0.05$ , esto permite rechazar la hipótesis nula, lo cual deja ver que la velocidad de entrada de aire tiene un efecto en el nivel de temperatura de la cámara de combustión, específicamente en el rango de velocidades, analizando el comportamiento de la temperatura es lineal a medida que aumenta la velocidad la temperatura promedio.

Figura 3. Intervalos de temperatura de Combustión



### IV. INDICADORES TERMOECONÓMICOS



En el monitoreo del gasificador y bajo las condiciones mecánicas se caracterizaron los caudales de salida del SYNGAS, el peso de residuo maderables, los caudales de entrada de aire y salida de syngas y tiempo de gasificación, el valor del poder calorífico se ajustó según [5], los precios de los residuos maderables se define según los valores de venta en la provincia del sugamuxi por kilogramo para el año 2022 y el valor de la energía eléctrica se calculó por el histórico promedio de valor del kWh para sector no residencial según datos extraídos de la empresa de energía de Boyacá EBSA, todos los datos anteriores se registran en la tabla 5. Lo anterior sirvió para identificar indicadores económicos y de rendimiento del gasificador.

Tabla 5. Condiciones Operativas

Condiciones	Valor	Unidad
Tiempo de gasificación por carga	4800	Seg
Peso total de la carga gasificador	9	kg
Caudal de Salida	0.009	M3/s
Poder Calorífico syngas	5	MJ/M3
Precio \$ de kg de residuo Maderable a 2022	160	\$/kg
Precio de la energía eléctrica a 2022	620	\$/MWh

Fuente autores

Bajo una correlación de las condiciones anteriores se determinó los siguientes indicadores termoeconómicos tabla 6, teniendo como base el histórico del precio promedio comercial de kWh en Boyacá para el año 2022 para el sector no comercial emitido por la empresa de energía de Boyacá EBSA, se calculó el valor promedio del kWh en \$620.

Tabla 6. Indicadores termoeconómicos

Indicador	Valor	Unidad
Potencia	43,75	kW
Energía	58,33	kWh
Potencial energía eléctrica	10,5	kWh
Producción	6510	\$/h
índice de producción	4,5	--

Fuente autores

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo fue posible realizar un análisis de un gasificador Downdraft. A partir de un análisis estadístico se corroboró que la variable de entrada de aire incrementa la temperatura de la cámara de combustión.

La optimización del proceso de gasificación para las características del gasificador Downdraft donde se realizaron las pruebas y bajo la correlación de variables en estudio, se identificó como parámetros óptimos de trabajo, el ajuste de la velocidad de entrada del aire a 4 m/s, variable que logró una respuesta en la temperatura de combustión promedio de 945°C, estableciendo unas condiciones satisfactorias para la producción de SYNGAS.

Las fluctuaciones de temperatura del gasificador pueden estar sujetas a las condiciones ambientales y a la característica mecánica de inyección de aire, en ciertos momentos se pudo

presentar ingresos de aire superiores, debido a corrientes de viento presentes en el ambiente, las cuales no fueron registradas en el estudio.

El diseño experimental correlacionó dos variables para identificación de punto óptimo de operación, sin embargo, el estudio se puede ampliar incluyendo un análisis elemental de la calidad del SYNGAS con el objetivo de identificar que influencia tiene la temperatura de combustión, en el poder calorífico del SYNGAS.

Bajo los parámetros de consumo de aire por tiempo de operación, se logró determinar la relación de consumo de leña por producción de potencia y energía del gasificador, identificando un índice de ganancia 1 a 4.5, lo anterior se entiende que por cada peso invertido en el proceso de gasificación se producen 4.5 pesos en energía eléctrica.

El potencial energético del syngas se define con mayor optimización en procesos de aprovechamiento de calor, donde se realiza la combustión directa del syngas a la salida del gasificador.

#### REFERENCIAS

- [1] J. C. Bandara, R. Jaiswal, H. K. Nielsen, B. M. E. Moldestad, Y. M. S. Eikeland, «Air Gasification Of Wood Chips, Wood Pellets And Grass Pellets In A Bubbling Fluidized Bed Reactor», *Energy*, Vol. 233, P. 121149, Oct. 2021, Doi: 10.1016/J.Energy.2021.121149.
- [2] B. Prabiur, «Combustion And Gasification In Fluidized Beds», 2006.
- [3] M. Aristizábal Y L. Valencia, «Diseño Conceptual De Un Gasificador Para La Producción De Gas De Síntesis A Partir De Residuos De Poda Generados En La Universidad Eafit», P. 76, 2015.
- [4] E. F. O. Ceron, «Diseño Y Construcción De Un Microgasificador Para Residuos De Cosecha De La Caña De Azúcar», P. 101, 2015.
- [5] J. Martillo, R. Lesme, A. Martínez, L. Oliva, Y L. Orozco, «Estudios Paramétricos De La Gasificación De La Tusa De Maíz .Pdf». Redalyc, 2019.
- [6] P. N. Sheth Y B. V. Babu, «Experimental Studies On Producer Gas Generation From Wood Waste In A Downdraft Biomass Gasifier», *Bioresour. Technol.*, Vol. 100, N.O 12, Pp. 3127-3133, Jun. 2009, Doi: 10.1016/J.Biortech.2009.01.024.
- [7] Universidad De Antioquia. Medellín, Colombia, L. Suárez-Hernández, J. F. Pérez Bayer, Universidad De Antioquia. Medellín, Colombia, R. Barrera Zapata, Y Universidad De Antioquia. Medellín, Colombia, «Gasificación De Madera Para La Obtención De Un Syngas Útil En La Producción De Biocombustibles Y/O Productos Químicos», *Rev. Ion*, Vol. 30, N.O 1, Pp. 57-71, Jul. 2017, Doi: 10.18273/Revion.V30n1-2017005.
- [8] A. Felipe Y R. Restrepo, «Modelación Matemática Simple (0-D) De Un Gasificador De Biomasa De Tipo Lecho Fijo Co-Corriente, "Downdraft"», P. 78, 2016.
- [9] C. R. Altafini, P. R. Wander, Y R. M. Barreto,