



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v9i1>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía para un gasificador downdraft

Mathematical model based on thermophysical composition and energy balance for a downdraft gasifier

Modelo matemático baseado na composição termofísica e balanço de energia para um gaseificador downdraft

Ángel Manuel Cedeño Casquete ^I
angelmanuelcc@yahoo.es
<https://orcid.org/0000-0003-3646-6382>

Manuel Ricardo Saltos Giler ^{II}
manuel.saltos@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8908-5116>

Correspondencia: angelmanuelcc@yahoo.es

***Recibido:** 29 de febrero de 2023 ***Aceptado:** 12 de marzo de 2023 * **Publicado:** 20 de abril de 2023

- I. Licenciado en Ciencias de la Educación, mención Física- Matemática, Docente investigador, Maestrante de la Maestría Académica con Trayectoria de Investigación en Matemática del Instituto de Postgrado de la Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.
- II. Docente investigador, Master en Energía, Universidad Técnica de Manabí (UTM). Docente Instituto de Nivelación y Admisión (IAN) de la Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

Resumen

La investigación que se presenta plantea un modelo que se basó en las características termofísicas de la biomasa, las leyes aerodinámicas y en el planteamiento de las ecuaciones de balance de energía y de especies, a través de los principales compuestos obtenidos en el gas generado como: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, metano, nitrógeno, alquitranes y agua. Tuvo como objetivo general: Describir un modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía de un gasificador downdraft, lo que permitió obtener los perfiles de temperaturas y la composición del gas generado mediante el proceso de gasificación para los desechos de biomasa. Los métodos utilizados se basaron en técnicas documentales y método deductivo, así como un acercamiento al método de diferencias finitas (MDF) el cual fue adecuado para resolver problemas en que el valor de la derivada satisfacía una ecuación diferencial parcial (EDP) con una variable temporal y unas pocas variables espaciales. Se estableció una prueba experimental con biomasa compuesta de algarrobo y el cálculo de los parámetros de operación presentes en el interior del gasificador. Se obtuvo como resultado que la composición de la fase gaseosa, mostró experimentalmente una desviación con respecto a lo encontrado en la literatura, obteniendo una varianza de 0.533, que significa que la brecha de exactitud entre las pruebas experimentales y las simulaciones a través del modelo no es significativa.

Palabras Claves: Modelo; Matemático; Gasificador downdraft; Biomasa; Energía.

Abstract

The research presented proposes a model that was based on the thermophysical characteristics of the biomass, the aerodynamic laws and the approach of the energy and species balance equations, through the main compounds obtained in the gas generated as: carbon monoxide, carbon dioxide, hydrogen, methane, nitrogen, tars and water. Its general objective was: To describe a mathematical model based on the thermophysical composition and the energy balance of a downdraft gasifier, which allowed obtaining the temperature profiles and the composition of the gas generated by the gasification process for biomass waste. The methods used were based on documentary techniques and the deductive method, as well as an approach to the finite difference method (FDM) which was adequate to solve problems in which the value of the derivative satisfied a partial differential equation (PDE) with a temporal variable. and a few spatial variables. An experimental test was established with biomass composed of carob and the calculation of the operating parameters present inside the gasifier.

Modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía para un gasificador downdraft

It was obtained as a result that the composition of the gas phase experimentally showed a deviation with respect to what was found in the literature, obtaining a variance of 0.533, which means that the accuracy gap between the experimental tests and the simulations through the model does not is significant.

Keywords: Model; Mathematical; downdraft gasifier; biomass; Energy.

Resumo

A pesquisa apresentada propõe um modelo que se baseou nas características termofísicas da biomassa, nas leis aerodinâmicas e na abordagem das equações de balanço de energia e espécies, através dos principais compostos obtidos no gás gerado como: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio, metano, nitrogênio, alcatrão e água. Seu objetivo geral foi: Descrever um modelo matemático baseado na composição termofísica e no balanço de energia de um gaseificador downdraft, que permitisse obter os perfis de temperatura e a composição do gás gerado pelo processo de gaseificação de resíduos de biomassa. Os métodos utilizados basearam-se em técnicas documentais e no método dedutivo, bem como uma abordagem ao método das diferenças finitas (FDM) que se mostrou adequado para resolver problemas em que o valor da derivada satisfazia uma equação diferencial parcial (PDE) com um valor temporário variável e algumas variáveis espaciais. Foi estabelecido um ensaio experimental com biomassa composta por alfarroba e o cálculo dos parâmetros de funcionamento presentes no interior do gaseificador. Obteve-se como resultado que a composição da fase gasosa experimentalmente apresentou um desvio em relação ao que foi encontrado na literatura, obtendo uma variância de 0,533, o que significa que a diferença de precisão entre os testes experimentais e as simulações através do modelo não é significativo.

Palavras-chave: Modelo; Matemático; gaseificador downdraft; biomassa; Energia.

Introducción

Un modelo matemático basado en control de variables para la composición del gas generado por un gasificador downdraft, implica considerar el aprovechamiento energético y eficiente de la biomasa como fuente de energía sostenible, impulsando el desarrollo de un modelo teórico-matemático y la solución del mismo con el objetivo de obtener una mejor visualización de la distribución de productos resultantes luego de la finalización del proceso.

Modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía para un gasificador downdraft

Los modelos matemáticos son perfiles de procesos de forma aproximada, que buscan ser cercanos a datos experimentales y también implementar la mayor cantidad de variables posibles manteniendo la simplicidad para el momento de la solución, buscan simplificar una representación de la realidad, con el uso de funciones para describir el comportamiento, las ecuaciones y las relaciones entre ellas (Bocco, 2010).

En este sentido, estudiar un sistema implica que el modelo matemático identifique aspectos del mismo como tal, para luego caracterizarlo mediante expresiones, por lo tanto, para generar un modelado se requiere un acercamiento a la realidad mediante la solución matemática de los parámetros implicados (Peñabaena, 2015). Tal es el caso particular de la investigación que se presenta como parte del avance de un trabajo de investigación en curso, de la Maestría Académica con Trayectoria de Investigación en Matemática, que será presentado ante el área de postgrado de la Universidad Técnica de Manabí (UTM).

Tomando en consideración que, la modelación matemática se realizó con base en el análisis del balance de energía y el balance de las especies que componen la fase volátil, que está dispuesta por el gas, los alquitranes y la biomasa. Siendo una tendencia actual, el uso de la modelación matemática para la gasificación, pues constituye una vía económica a la hora de diseñar o evaluar un equipo o sistema de gas, ahorrando tiempo y costos con el propósito de describir el proceso dando la composición a obtener sin necesidad de desarrollar experimentos, los cuales pueden resultar costosos al requerir de equipos de elevada adquisición (Vicente et al., 2016).

Particularmente, la gasificación de biomasa se utiliza para mejorar la eficiencia y reducir los costos de inversión de la generación eléctrica a través de la tecnología de uso de turbinas de gas, motores de combustión interna, entre otras. En diversas partes del mundo han empezado a promover el uso de energías renovables que tienen como objetivo reducir el impacto ambiental provocado por la utilización de los combustibles fósiles tradicionales, así como al aumento de su demanda, la variabilidad de los precios de las fuentes primarias y los problemas medioambientales que se derivan de su utilización (Estrada, 2016).

Especialmente, la (Organización Mundial de las Naciones Unidas [ONU], 2018) reafirma la importancia de que “los compromisos asumidos en el Diálogo de Alto Nivel sobre la Energía de 2021 y en la COP26, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático celebrada en Glasgow en 2021, se traduzcan en acciones sobre este terreno”. Razón por la cual, el interés en la energía de la biomasa o bioenergía ha aumentado al ser una fuente que se puede generar a nivel local,

Modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía para un gasificador downdraft

con el uso de residuos urbanos, la agricultura y/o cultivos energéticos, por su amplia disponibilidad potencial y neutral en relación con las emisiones de dióxido de carbono (Acosta y Chipatecua, 2018). Y el modelado matemático de los mismos pueden dar respuestas a mejorar el rendimiento de estos sistemas.

El aprovechamiento energético de la biomasa se puede realizar mediante procesos bioquímicos como la fermentación alcohólica, digestión anaeróbica y digestión aeróbica, también por termoquímicos como la pirólisis, gasificación, licuefacción y combustión, así como por fisicoquímicos como la extracción y transesterificación (Pandey et al., 2013). La utilización de modelos matemáticos permite estudiar la influencia de los parámetros que intervienen en un proceso de transformación de la energía por gasificación y la evolución de las variables de interés en el tiempo.

Asimismo, el uso de Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP) y Ordinarias (EDO) nacen de los balances de masa, de cantidad de movimiento, de energía y de especies en caso de reacciones químicas para el modelado y para entender los sistemas térmicos, mecánicos e hidráulicos. También se presenta un desafío para conocer la composición de gas a obtener de una determinada biomasa, su composición o el valor de la eficiencia del proceso en un gasificador tipo downdraft. A partir de condiciones específicas del gasificador como temperatura del lecho y características termofísicas de la biomasa se puede lograr un acercamiento a la hora de modelar una instalación de gasificación.

Es por ello que, existen antecedentes de modelos matemáticos obtenidos de la experimentación para la caracterización de la biomasa y del proceso de gasificación a partir de esta. En este sentido, (Lalta et al., 2014) estudiaron los modelos Lagrangianos utilizados para desarrollar un modelo cinético que consideró el secado y la recondensación de la humedad en el proceso de pirólisis desde tres reacciones primarias paralelas y dos reacciones secundarias de craqueo de los alquitranes en volátiles y carbón. Otro modelo matemático desarrollado a partir de la ecuación de energía para el equilibrio termodinámico, fue el de (Daniyanto et al., 2015) el cual hizo referencia al modelo para gasificador de lecho fijo downdraft donde a partir de Gibbs obtuvo predicciones de la composición del gas producto en la gasificación de la madera de Eucalipto.

Se experimentaron y modelaron modificaciones constructivas en base a cálculos de los diferentes intercambios, transformaciones y procesos de los gasificadores existentes, se optimizaron parámetros de operación con el objetivo fundamental de elevar la calidad del gas que se producía, aumentando su valor calórico, disminuyendo el contenido de alquitrán, para obtener combustibles de mayor calidad y otros materiales.

Ecuaciones y procesos de transferencia de calor y de masa

En el gasificador downdraft se presenta transferencia de calor por conducción entre la pared del reactor, las partículas de la cama y entre las mismas partículas, convección entre la pared del reactor y la fase gaseosa, entre la fase gaseosa y las partículas y entre la misma fase gaseosa. La radiación se presenta entre las partículas de la cama, entre la pared del reactor y las partículas de la cama, entre la pared del reactor y la fase gaseosa y entre la fase gaseosa y las partículas.

Asimismo, transferencia de masa por convección entre la fase gaseosa y las partículas y entre la misma fase gaseosa y dispersión en la fase gaseosa. El modelo no tiene en cuenta la transferencia de calor por radiación entre el gas y las partículas, ni entre la pared del reactor y el gas debido a que en los gases la radiación solo es apreciable en procesos a alta temperatura como la combustión.

Las ecuaciones de balance de especies se desarrollan para los principales compuestos obtenidos en el gas generado, que son: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), nitrógeno (N₂), alquitranes y agua. En el proceso de gasificación también se producen pequeñas cantidades de algunos hidrocarburos pesados y por eso estos no se tienen en cuenta dentro de las especies a balancear en el modelo.

Tampoco se plantean ecuaciones de cantidad de movimiento en la dirección radial ya que se puede suponer que la velocidad en tubo vacío para la sección transversal del reactor es constante. Esto se explica porque como existe un contacto directo entre el medio de calentamiento y los productos presentes en el reactor, los gradientes de temperatura dentro de la cama en la dirección radial son bajos, lo cual ayuda a que la velocidad de reacción sea constante para toda la sección transversal del equipo, y por lo tanto a que la velocidad de la cama y el encogimiento de las partículas en la dirección radial sean iguales. Las ecuaciones de balance de energía y de masa se plantean en coordenadas cilíndricas (fig. 1).

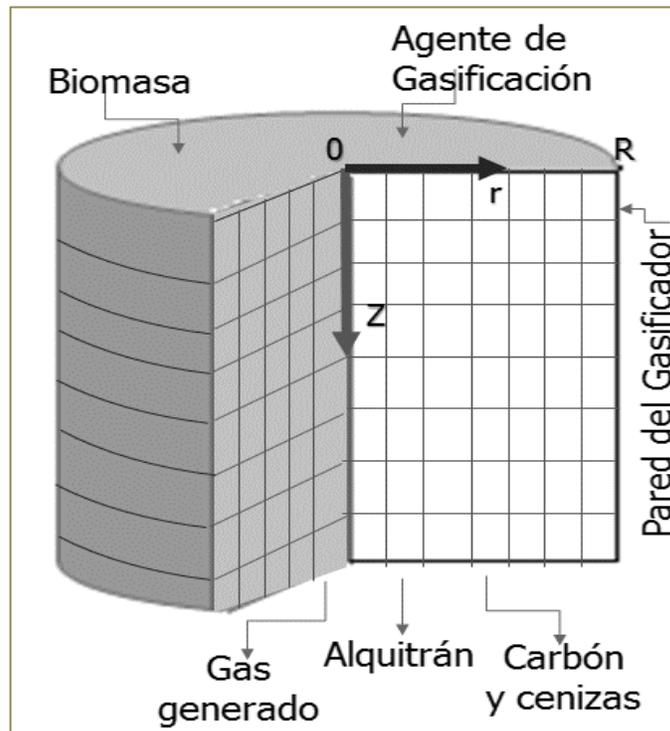


Figura 1. Representación del gasificador downdraft en coordenadas cilíndricas

En las ecuaciones de balance de la fase gaseosa se considera que la presión total dentro del gasificador permanece constante y es igual a la presión atmosférica. El balance de energía de la fase gaseosa se simplifica suponiendo que la transferencia de calor por dispersión en la dirección axial es depreciable por ser mucho menor que la transferencia de calor por convección debido al alto flujo de gas, la velocidad de los gases en la dirección radial es depreciable y por lo tanto la *transferencia de calor* por convección en esa dirección también lo es, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$(cC_{p,m})^g \frac{\partial T^g}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{r,th}^g \frac{\partial T^g}{\partial r} \right) - (cC_{p,m})^g w_{ax}^g \frac{\partial T^g}{\partial z} - \frac{h_{GP} A_{esp}}{\varepsilon_b} (T^g - T_{sup}^s) - q_{th}^g \quad (1)$$

Donde:

$$q_{th}^g = \sum_{j=1}^n \Delta h_{r,m} r_{v,i} \quad (2)$$

$$A_{esp} = \frac{A_p n_p}{V_{total}} \quad (3)$$

$(cC_{p,m})^g$ = corresponde a los gases albergados en los poros de la fase sólida

Modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía para un gasificador downdraft

$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{r,th}^g \frac{\partial T^g}{\partial r} \right)$ = transferencia de calor por dispersión en la dirección radial

$(c C_{p,m})^g w_{ax}^g \frac{\partial T^g}{\partial z}$ = transferencia de calor por convección en la dirección axial

$\frac{h_{GP} A_{esp}}{\varepsilon_b} (T^g - T_{sup}^s)$ = transferencia de calor por convección entre la fase sólida y gaseosa teniendo en cuenta la porosidad del lecho

q_{th}^g = generación por las reacciones químicas al interior del reactor en la fase gaseosa

A_{esp} = área específica de transferencia, representa el área de transferencia de calor entre las fases sólidas y gaseosa por unidad de volumen

La existencia del penúltimo término hace que las ecuaciones de balance de energía de las dos fases se deban resolver de manera simultánea. El área superficial de las partículas, la cual se considera esférica, A_p , y el número de partículas n_p se encuentran mediante:

$$A_p = \pi d_p^2 \quad (4)$$

$$n_p = \frac{V^s}{V_p} \quad (5)$$

Condiciones de frontera

- En el punto medio del gasificador, el gradiente de temperatura desaparece debido a la simetría térmica, por tanto, se tiene: $r=0$

Significa que:

$$\frac{\partial T^g}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

- Transferencia de calor por convección entre la pared y el gas en la pared del gasificador: $r=R$ significa que

$$\lambda_r^g \frac{\partial T^g}{\partial r} = h_{WG} (T_W - T_R^g) \quad (7)$$

- A la entrada del gasificador la fase gaseosa se encuentra a una temperatura establecida, $z=0$ significa

$$T^g = T_0 \quad (8)$$

- A la salida del gasificador no se presenta transferencia de calor: $z=L$ significa que

$$\frac{\partial T^g}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

Condición inicial:

- La temperatura de la fase gaseosa es conocida: $t=0$ significa que

$$T_{m,n}^g = T_{in}^g \quad (10)$$

El balance de especies de la fase gaseosa se simplifica suponiendo que la transferencia de masa por dispersión en la dirección axial se desprecia por ser mucho menor que la transferencia de masa por convección debido al alto flujo de gas, la velocidad de los gases en la dirección radial es despreciable, por tanto, la *transferencia de masa* por convección también lo es, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{i,r} \frac{\partial c_i}{\partial r} \right) - \frac{\partial (w_{ax}^g c_i)}{\partial z} - \frac{\beta A_{esp}}{\varepsilon_b} (c_i^g - c_{i,sup}^s) \quad (11)$$

Donde:

$\frac{\partial c_i}{\partial t}$ = acumulación para cada especie

$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{i,r} \frac{\partial c_i}{\partial r} \right)$ = transferencia de masa por dispersión en la dirección radial

$\frac{\partial (w_{ax}^g c_i)}{\partial z}$ = transferencia de masa por convección en la dirección axial

$\frac{\beta A_{esp}}{\varepsilon_b} (c_i^g - c_{i,sup}^s)$ = transferencia de masa por convección entre la fase sólida y la gaseosa teniendo

en cuenta la porosidad del lecho

Condiciones de frontera

- En el punto medio del gasificador, el gradiente de concentración desaparece debido a la simetría del equipo: $r=0$ significa que

$$\frac{\partial c_i^g}{\partial r} = 0 \quad (12)$$

- No se presenta transferencia de masa en la dirección radial para la pared del reactor: $r=R$ significa que

$$\frac{\partial c_i^g}{\partial r} = 0 \quad (13)$$

- A la entrada del reactor la fase gaseosa se encuentra con una composición de entrada establecida: $z=0$ significa que

$$c_i^g = c_{i,in}^g \quad (14)$$

- A la salida del gasificador no se presenta transferencia de masa: $z=L$ significa que

$$\frac{\partial c_i^g}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

Condición inicial

La composición de la fase gaseosa es conocida e igual a la del agente de barrido empleado: $t=0$ significa que

$$c_{m,n}^g = c_{N_2} \quad (16)$$

Al igual que la fase gaseosa en la fase sólida se considera que la presión total dentro del gasificador permanece constante e igual a la presión atmosférica. El balance de energía de la fase sólida se simplifica suponiendo que: la transferencia de calor en la dirección radial se presenta solo por conducción, ya que no se presenta flujo de partículas en esa dirección, la transferencia de calor en la dirección axial se presenta por conducción, convección y las partículas de la fase sólida son de forma esférica. Obteniéndose la siguiente ecuación:

$$(cC_{p,m})_e^s \frac{\partial T^s}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_e^s \frac{\partial T^s}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_e^s \frac{\partial T^s}{\partial z} \right) - (cC_{p,m})_e^s w_{ax}^s \frac{\partial T^s}{\partial z} - \frac{h_{GPAesp}}{1-\epsilon_b} (T^g - T_{sup}^s) - q_{th}^s \quad (17)$$

$$(cC_{p,m})_e^s \frac{\partial T^s}{\partial t} = \text{acumulación}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_e^s \frac{\partial T^s}{\partial r} \right) = \text{transferencia de calor por conducción en la dirección radial efectiva}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_e^s \frac{\partial T^s}{\partial z} \right) = \text{transferencia de calor por conducción en la dirección axial efectiva}$$

$$(cC_{p,m})_e^s w_{ax}^s \frac{\partial T^s}{\partial z} = \text{transferencia de calor por convección en la dirección axial}$$

$$\frac{h_{GPAesp}}{1-\epsilon_b} (T^g - T_{sup}^s) = \text{transferencia de calor de fase sólida a gaseosa teniendo en cuenta la porosidad del lecho}$$

$$q_{th}^s = \text{generación debido a las reacciones químicas al interior del reactor en la fase sólida}$$

Condiciones de frontera

- En el punto medio del gasificador, el gradiente de temperatura desaparece debido a la simetría del equipo: $r=0$ significa que:

Modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía para un gasificador downdraft

$$\frac{\partial T^s}{\partial r} = 0 \quad (18)$$

- Transferencia de calor por conducción y radiación entre la pared y las partículas, en la pared del gasificador: $r=R$ significa que:

$$\lambda_e \frac{\partial T^s}{\partial r} = (h_{WP} + h_{rad,WP})(T_W - T_R^s) \quad (19)$$

- A la entrada del gasificador la biomasa se encuentra con la temperatura del ambiente circundante: $z=0$ significa que:

$$T^s = T_{amb} \quad (20)$$

- A la salida del gasificador no se presenta transferencia de calor: $z=L$ significa que:

$$\frac{\partial T^e}{\partial z} = 0 \quad (21)$$

Condición inicial

- La temperatura de la fase sólida es conocida: $t=0$ significa que:

$$T_{m,n}^s = T_0^s \quad (22)$$

Según Schlunder y Tsotsas (1988), el balance de especies para la fase gaseosa contenida en los poros de la fase sólida se simplifica en la siguiente expresión:

$$r_{v,i} = \frac{\epsilon_b}{1 - \epsilon_b} \beta A_{esp} (c_i^g - c_{i,sup}^s) \quad (23)$$

Esta ecuación representa la transferencia de masa entre la fase gaseosa y los gases contenidos en los poros de la fase sólida y es válida suponiendo que no existen gradientes de concentración al interior de las partículas, es decir cuando la fase sólida se considera homogénea.

Condición inicial:

- La composición de la fase gaseosa contenida en los poros de la fase sólida es conocida e igual a la del agente de barrido empleado $t=0$ significa que

$$c_{supm,n}^s = c_{N_2} \quad (24)$$

Para la solución de las ecuaciones de balance planteadas deben determinarse las propiedades físicas y químicas de las fases sólida, gaseosa, los coeficientes de transferencia de calor y masa en función de la temperatura y composición. La biomasa empleada en la fase sólida se toma de la literatura de datos experimentales y se consideran constantes.

Modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía para un gasificador downdraft

En la fase gaseosa se compone también de aire adicional introducido al equipo como agente de gasificación y del proceso de secado de la biomasa y N_2 empleado como gas de barrido. El hecho de introducir aire como agente gasificante, aporta por un lado ventajas como, el aumento de la temperatura, provoca el craqueo de parte de los alquitranes formados, y así una disminución de estos en el gas obtenido. El principal inconveniente es que el aumento de la temperatura puede provocar la disminución de las propiedades del gas obtenido.

Para determinar las propiedades físicas de la fase gaseosa es necesario conocer las propiedades de cada uno de sus componentes individuales, estos son CO , CO_2 , CH_4 , H_2 , H_2O y alquitranes. Para la determinación de las propiedades de los componentes, es válida la suposición de gas ideal, debido a la baja presión de operación del equipo (Schlunder y Tsotsas, 1988). Las propiedades de la fase sólida no tienen influencia sobre las propiedades de la fase gaseosa, excepto en la dispersión.

Fueron determinadas la viscosidad dinámica, conductividad térmica y calor específico molar en función de la temperatura de cada uno de los componentes y de la mezcla de gases para la fase gaseosa. Para el análisis y modelación de los fenómenos de transporte fue necesaria la determinación de los coeficientes de dispersión que describieron la magnitud de estos fenómenos. Para los gases, los coeficientes de difusión binarios se asumen como independientes de la composición del gas.

Materiales y métodos

La investigación tuvo como objetivo general: Describir un modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía de un gasificador downdraft. Principalmente se utilizó el método documental y el deductivo, en términos que se realizó una revisión bibliográfica detallada de diversos conceptos e investigaciones relacionadas con las modelaciones numéricas para mejorar el rendimiento del gasificador downdraft, así como la expresión de las ideas desde elementos generales hasta conclusiones particulares.

En la modelación matemática de gasificadores de lecho fijo, es característica común que la velocidad del gas para toda la sección transversal sea constante cuando la temperatura lo es. Esto ocurre sólo si la porosidad es constante, por tanto, no es necesario el planteamiento y solución de ecuaciones de cantidad de movimiento para determinarlas, pues la velocidad de la fase gaseosa en el área inferior del volumen de control.

Entonces se determina mediante el planteamiento de la ecuación de balance de masa para el elemento de volumen, conociendo la concentración del gas al inicio y al final del intervalo de tiempo en función

Modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía para un gasificador downdraft

de la temperatura y el cambio en el número de moles del gas debido al proceso de secado y las reacciones químicas de pirólisis y gasificación.

En la discretización de las ecuaciones de balance de energía y de especies en las que se presentan fenómenos de transporte por difusión y convección, fue importante introducir una variable adimensional conocida como número de Péclet el cual relaciona las velocidades de los fenómenos de transporte por convección y por difusión.

Para la solución de las mismas se emplearon métodos numéricos, propios de las matemáticas aplicadas, la Northwestern University (2021) afirma que “implica la aplicación de las matemáticas a problemas que surgen en diversas áreas, por ejemplo, ciencia, ingeniería u otras áreas diversas, y/o el desarrollo de métodos nuevos o mejorados para enfrentar los desafíos”.

De manera que, se inició con un campo esperado o inicial de la variable de interés y se emplearon las ecuaciones discretizadas para obtener un campo mejorado, más cercano a la solución exacta. Al realizar múltiples repeticiones del algoritmo, se obtuvo una solución suficientemente cercana a la solución exacta de las ecuaciones.

Los procesos de transformación de biomasa que se presentan al interior del gasificador de lecho fijo ocurren de manera independiente y secuencial a medida que la biomasa fluye a lo largo del reactor e incrementa su temperatura. Estos procesos se pueden modelar de manera separada y luego ser vinculados en el desarrollo del modelo general.

Se emplea el método de los volúmenes de control, el cual se basa en la aplicación de los balances de masa, de energía y de cantidad de movimiento para cada uno de estos llegando a una forma discretizada de las ecuaciones diferenciales y no requiere de conocer previamente las ecuaciones diferenciales que se aplican en cada volumen de control, además demanda de un menor manejo matemático y permite una mayor comprensión de los fenómenos físicos presentes.

De este modo para un sistema estacionario el método numérico que más se ajustó son los elementos finitos y dentro de estos el Método de Diferencias Finitas (MDF) el cual fue adecuado para resolver problemas en que el valor de la derivada satisface una EDP con una variable temporal y unas pocas variables espaciales.

Resultados y discusión

Para discretizar las ecuaciones se empleó el método de diferencias finitas con la técnica de mallado, analizando cada nodo en la malla. La discretización de la ecuación de balance de masa para la fase

Modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía para un gasificador downdraft

gaseosa se realiza de manera similar a las ecuaciones de balance de energía, teniendo en cuenta las ecuaciones de balance y condiciones de frontera planteadas.

Fueron calculados el coeficiente de dispersión radial para la transferencia de masa a partir del *número de Péclét* efectivo, análogamente se puede hallar este coeficiente para la transferencia de calor, el *número de Péclét* efectivo en la dirección radial para el transporte de masa y para el transporte de calor. La tortuosidad para una cama aleatoria de partículas esféricas se tomó como $\tau = 1,2$.

Se determinó la conductividad térmica de la fase sólida. La velocidad en la cual se mueve la fase sólida en cada elemento de volumen se pudo determinar a partir de la velocidad de pérdida de masa que se presentó en el volumen de control. El coeficiente de transferencia de calor entre la fase sólida y la fase gaseosa se determinó a partir del *número de Nusselt*.

El coeficiente de transferencia de calor entre la pared y la fase gaseosa fue difícil de determinar debido a la transferencia de calor simultánea entre la pared y las partículas. Sin embargo, el coeficiente de transferencia de calor pudo obtenerse de experimentos de transferencia de masa a través de la analogía entre transferencia de calor y transferencia de masa. También se calculó la transferencia de calor por conducción entre la pared, la fase sólida y el coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la pared y la fase sólida.

Los parámetros empleados para las simulaciones se tomaron teniendo en cuenta las condiciones de operación de un gasificador de prueba existente en la bibliografía consultada, del cual se tienen resultados de pruebas experimentales. El mismo fue de un reactor tubular de acero calentado indirectamente, cuyo diámetro interno es de 8,25 cm.

El reactor se encuentra dividido en dos zonas: una de secado y pirólisis y una de gasificación, la zona de secado y pirólisis se calienta mediante un intercambiador de calor tubular por el que fluye aire, que se calienta previamente a través del horno eléctrico que calienta la zona de gasificación. Este horno puede alcanzar una temperatura máxima de 1400 K. La zona de secado y pirólisis tiene una longitud de 0,5 m mientras que la zona de gasificación tiene 1,0 m, para una longitud total del reactor de 1,5m.

Por la parte superior del reactor se alimenta N_2 que se emplea como gas de barrido y biomasa de manera continua en función de la pérdida de masa del sólido presente en su interior. Los gases generados salen por la parte inferior del reactor para su posterior análisis (Ramírez, 2016).

El gasificador tiene 1,5 m de diámetro. Al inicio del proceso el reactor se encuentra lleno de biomasa, compuesta de madera de algarrobo, cuyo contenido de humedad se determinó que era del 12 %, se

Modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía para un gasificador downdraft

humece previamente hasta el valor establecido para aumentar la concentración de aire, el cual se emplea como agente de gasificación.

La temperatura de entrada de las fases sólida y gaseosa son iguales y constantes (300 K). La temperatura inicial de la pared del gasificador es 300 K. Esta temperatura varía tanto con el tiempo como con la posición. La velocidad de la fase sólida a la salida del reactor es nula. El diámetro inicial de las partículas, las cuales se consideran de forma esférica, es de 0,02 m (Tab.1).

Tabla 1. Composición de las especies en el modelo

H ₂	CO	CO ₂	CH ₄
0,298	0,3013	0,2101	0,1906

En el modelo la longitud equivalente a 0m corresponde una temperatura ambiente de 300,15K, como se presentó anteriormente en las condiciones de frontera. En la figura 2 se muestra la fracción másica de los diferentes componentes gaseosos formados, se encuentra el consumo de biomasa y la formación de fase volátil, observándose la influencia de la temperatura para $r=R/2$.

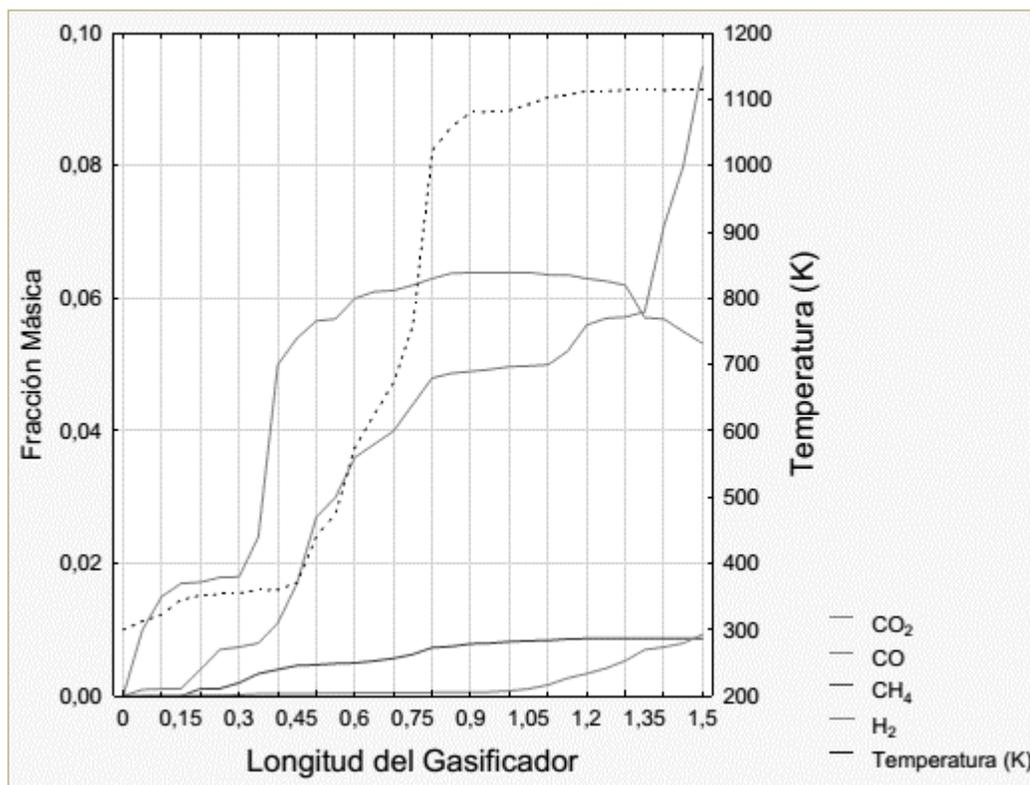


Figura 2. Composición del gas producto para $r=R/2=4,125$

Modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía para un gasificador downdraft

Se puede observar que la fracción másica de la biomasa disminuye porque promueve que se den las reacciones de gasificación, lo que significa que la conversión de H_2 aumenta y de esta forma incrementa la concentración de hidrógeno en el gas de síntesis.

La siguiente figura 3 muestra la composición final de los gases. Esta gráfica está en función de la temperatura de las partículas en un radio de $R/2$ con el fin de observar cuál es la influencia en la concentración de CO y H_2 de las reacciones de gasificación que se estudiaron donde se alcanzan temperaturas muy altas.

De este modo se puede concluir que aproximadamente a un metro en la longitud del reactor se empiezan a dar las reacciones de gasificación ya que se observa un consumo de CO_2 y a su vez un crecimiento acelerado de la conversión de los productos de interés de las reacciones de gasificación, el CO y H_2 en este radio.

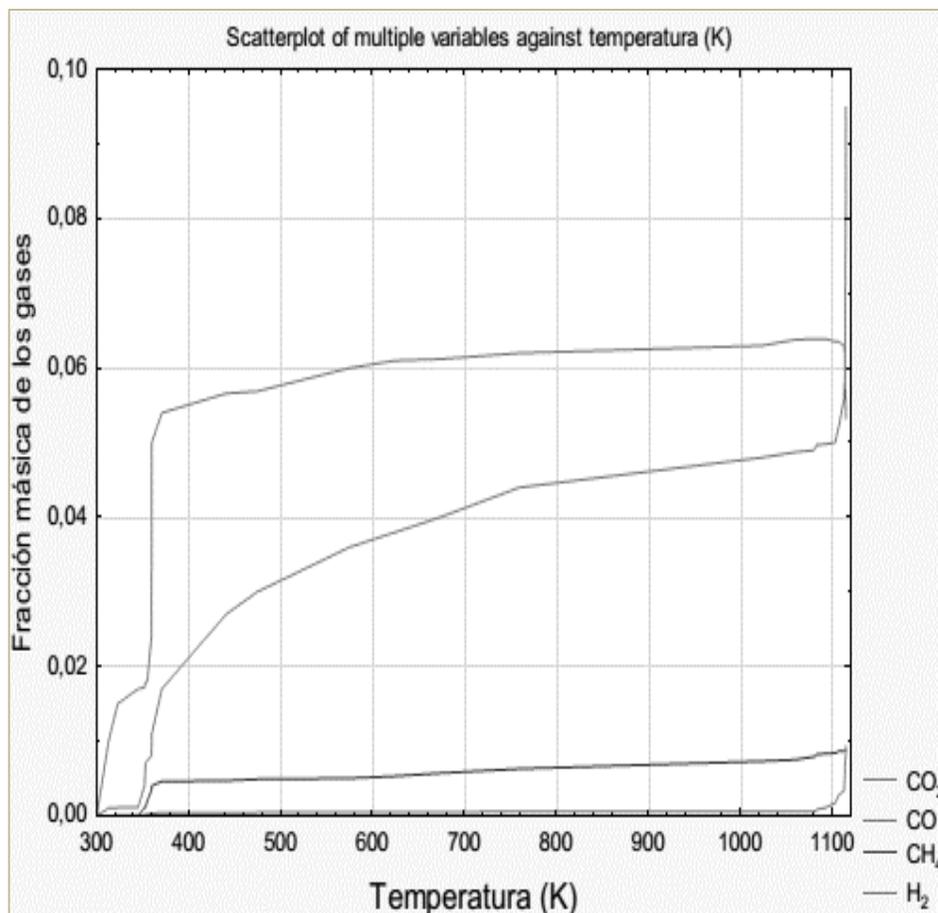


Figura 3. Composición de los gases vs Temperatura

Modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía para un gasificador downdraft

Al comparar con el resultado obtenido utilizando este gasificador para datos reales con residuos de madera se tiene que la desviación estándar para el producto final fue de 0.73, indicando una varianza de 0.533, que significa que la diferencia entre el resultado real y el obtenido a través del modelo no es significativa.

Conclusiones

Describir un modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía de un gasificador downdraft, permitió determinar los perfiles de temperatura y la composición del gas generado a través de la evaluación termodinámica y el control de las variables del proceso.

El modelo matemático desarrollado se basó en las características termofísicas de la biomasa, las leyes aerodinámicas y en el planteamiento de las ecuaciones de balance de energía y de especies. En este sentido, la solución se generó mediante el método de diferencias finitas teniendo en cuenta una serie de consideraciones, siendo así que este modelo responde a una primera aproximación al proceso estudiado, obteniendo resultados satisfactorios.

Se analizó el proceso de descomposición térmica de la madera de algarrobo como dato experimental comparativo, poniendo de manifiesto bajos porcentajes de cenizas y contenidos de humedad en la calidad de las fracciones orgánicas analizadas. La pérdida total de peso en la muestra analizada mediante TGA fue del 98,44 % resultando un 1,56% de cenizas. El PCS de la biomasa tuvo como resultado 19908,35 kJ/kg. El PCI aproximado del algarrobo fue 19,08231 MJ/kg.

La gasificación de los residuos de algarrobo produjo un gas de síntesis con un PCI de 4,2437 MJ/Nm³. Por tanto, los residuos biomásicos del algarrobo reunieron características adecuadas para su uso como combustible. La composición de la fase gaseosa, muestra la desviación que se tiene con respecto a lo que se obtiene experimentalmente en la literatura, encontrando una varianza de 0.533, que significa que la diferencia entre el resultado real y el obtenido a través del modelo no es significativa.

Referencias

1. Acosta, P.A y Chipatecua, L.A (2018). Modelación del Proceso de Gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo con calentamiento indirecto. Fundación Universidad de América, vol. 2. Bogotá D.C. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6690>

2. Bocco, M. (2010). Funciones elementales para construir modelos matemáticos. Argentina: Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
<http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL001843.pdf>
3. Daniyanto, Sutidjan, Deendarlianto, y Budiman, A. (2015). Torrefaction of Indonesian Sugar-cane Bagasse to Improve Bio-syngas Quality for Gasification Process. *Energy Procedia*, 68, 157–166.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215005500>
4. Estrada M. C. A (2016) Modelado unidimensional y multipartícula del proceso de gasificación de biomasa lignocelulósica en una planta industrial. Universidad de Valladolid.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=295756>
5. Lalta Prasad, J.P. Subrahmanyam, y P.M.V. Subbarao. (2014). Pyrolysis and gasification characteristics of Pongamia residue (de-oiled cake) using thermogravimetry and downdraft gasifier. *Applied Thermal Engineering* (63), 379-386.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135943111300793X>
6. Northwestern University. (19 de octubre de 2021). Ciencias de la Ingeniería y Matemáticas Aplicadas. <https://acortar.link/yLEwp6>
7. Pandey, S. B. Baral, S. K y Aadar, S.I (2013). Prediction of Syngas Composition from Biomass Gasification using Thermodynamics Equilibrium Model. *Rentech Symposium Compendium*, vol. 3.
8. Peñabaena, R. (2015). Diseño y optimización de un modelo matemático para la transición entre el cambio de planes de los tiempos de reparto de los semáforos. España: Universidad de Cantabria. <https://acortar.link/958vZz>
9. Ramírez, R. A. C (2016). Modelación Matemática Simple (0-D) de un Gasificador de Biomasa de Tipo Lecho Fijo Co-Corriente, “Downdraft.” Universidad Eafit. Escuela de Ingeniería. Medellín. <https://core.ac.uk/download/pdf/84841956.pdf>
10. Schlunder, U. y Tsotsas, E (1988). *Warme ubertragung in Festbetten, durchmischten Schuttgutern und Wirbelschichten*, Stuttgart: Georg Thieme-Verlag.
<https://acortar.link/mvBGpK>
11. Vicente, P., Albesa, E. y Condorí, M (2016). Estudio Experimental de Gasificación en un gasificador Downdraft prototipo. *ASADES*, vol. 4, pp. 06.151-06.161.
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/65986>

Modelo matemático basado en la composición termofísica y el balance de energía para un gasificador downdraft

©2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).