

Modelación numérica de la co-combustión de carbón y biomasa pulverizado

Miguel Emigdio Doria Oviedo¹, Jorge Mario Mendoza Fandiño², Rafael David Gómez Vásquez³

ICT. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Córdoba, Colombia. Email: mdoriaoviedo@correo.unicordoba.edu.co

ICT. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Córdoba, Colombia. Email: jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co

ICT. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Córdoba, Colombia. Email: rafaeldgomez@correo.unicordoba.edu.co

Resumen

En este trabajo se desarrolla mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD) un modelo numérico de la co-combustión de carbón mineral y tusa de maíz pulverizado en cámara de combustión con el fin de estudiar el factor de emisiones y rendimiento energético del proceso. Para el modelo se usan de ecuaciones de Navier-Stokes, Lagrange-Euler para la trayectoria de las partículas, el modelo de turbulencia standard k-epsilon, modelo de radiación DO, transporte de especies, modelo de dispersión. Se caracterizaron los combustibles y se definió el modelo matemático. Al tener todos los parámetros y condiciones se simuló el proceso en un software computacional para cada tipo de mezcla usada. Al obtener los resultados, estos se analizan las emisiones de SO_x, NO_x, CO₂ de lo cual se observó una disminución en las emisiones de los contaminantes.

Palabras clave: CFD; Co-combustión; carbón; Tusa de maíz.

Abstract

A numerical model of the cofiring of coal and pulverized corncob was developed through computational fluid dynamics (CFD) in order to study the emissions and energy efficiency of the process. For the model are used the Navier-Stokes equations, Lagrange-Euler model for the trajectory of particles, the standard epsilon turbulence model, DO radiation model, species transport and the dispersion model. The data of the fuels was taken from previous articles. With all the parameters and conditions, the process was simulated in software for each type of mixture used. From the results were analyzed the emissions of SO_x, NO_x, CO₂. From these results a decrease in pollutant emissions was observed.

Keywords: CFD; Co-firing; Coal; Corncob.

1. Introducción

En la última década se han realizado diálogos climáticos sobre las políticas energéticas de los países más importantes del mundo están en la búsqueda de diversificar la matriz energética mundial. Esto, con el objetivo de abreviar las emisiones de carbono hecha por los combustibles fósiles, si no optimizar la cobertura y mejorar la seguridad energética en todas las regiones [1]. Para esto hay una exploración y direccionamiento hacia las energías alternativas prometen mayor beneficio y aprovechamiento, debido a su potencial en las zonas no interconectadas que no tienen acceso a las energías convencionales. El carbón actualmente domina casi la tercera parte del consumo energético mundial. Sin embargo, permanece como uno de los combustibles con mayores emisiones de

contaminantes [2]. Es por esta razón que se deben buscar alternativas que ayuden a la transición energética del carbón, usando otros combustibles que ayuden a una transición viable, siendo la adición de biomasa al proceso de combustión del carbón uno de los más usados. No obstante, se debe investigar, desarrollar y mejorar los con el fin de que puedan sustituir los combustibles tradicionales o generar energía conjuntamente para mejorar su eficiencia energética.

La Co-Combustión promete ser una de las energías no convencionales con mayor potencial de uso, debido a su bajo costo, alta eficiencia y relativa baja emisión de CO₂ [3]. Por otra parte, el carbón y la biomasa han sido estudiados y analizados ampliamente, por lo que es de alta importancia el estudio específico de cada biomasa local por cada tecnología usada, así como

comprender los fenómenos que se presentan en la generación de energía para cada equipo y tipo de combustible. Por otro lado, cada país o zona debe implementar y desarrollar su matriz energética de acuerdo con sus recursos y capacidad tecnológica. Es de resaltar, que la región donde se realiza el estudio, el departamento de Córdoba produce alrededor de 140.000 toneladas de tusa de maíz al año [4], por tanto, esta biomasa presenta un gran potencial como uso energético. [5].

Autores como [5] y [6] definen la co-combustión de biomasa con carbón como la mezcla de dos combustibles diferentes, siendo uno el combustible principal y el otro su complemento. En la mayoría de los casos, el carbón es el combustible dominante y se aplican los principios de mezcla. Los combustibles de biomasa y el carbón varían significativamente en sus propiedades, lo que hace que algunas combinaciones de biomasa y carbón se les puede sacar gran provecho, mientras que otras no tanto. Por otra parte, es de resaltar que la tusa de maíz se usa actualmente para la producción de energía alrededor del mundo. Esta materia prima se está desarrollando exponencialmente como material para proyectos de etanol celulósico, co-combustión y gasificación ya que las mazorcas de maíz son densas y uniformes, además de tener un valor calorífico alto, generalmente bajos contenidos de Nitrógeno y azufre[7]

El carbón pulverizado ha sido una de las principales y más usadas para la transformación energética del carbón. Sin embargo, la combustión de esta es muy compleja, donde los componentes minerales, carboníferos y de gases sufren transformaciones en la cámara de combustión a más de 1770 [K] lo que lleva a un gran número de reacciones [8]. Por otra parte, La dinámica de fluidos computacional (CFD) ha sido puesta en uso a lo largo de los últimos años con el fin de estudiar la combustión de carbón y biomasa en diferentes aspectos, llegando así a recomendaciones como la hecha por Pérez-Jeldres et al., 2017 [9] que sugiere un máximo porcentaje de biomasa no debe superar el 20% de la mezcla, el diámetro de partícula debe estar entre 0.5 y 1 mm, debido a que si son de diámetro más grande puede que no se consuman completamente o que el combustible es recomendable alimentarlo por la parte baja de la cámara para así alcanzar temperaturas más altas.

Las características de la cinética de combustión del carbón pulverizado/tusa de maíz fueron estudiadas por medio de un analizador termogravimétrico. Se estudiaron los efectos de la relación de la mezcla, la temperatura y los carbones sobre la cinética. Además, se realizó el análisis teórico y algunas conclusiones a través de curvas de pérdida de peso de la muestra. se concluyó que entre mayor el porcentaje de mezcla de

tusa de maíz, menos energía de activación y mayor tasa de pérdida de peso promedio y más temprano el tiempo de agotamiento. Los tipos de carbón también juegan un papel importante en la determinación de las características de combustión de las mezclas de carbón y mazorca de maíz. El efecto de la tusa de maíz que promueve la quema y el agotamiento del carbón se vuelve más evidente con carbón menos volátil.

Khodaei et al [10] efectuaron un estudio el cual proporciona una descripción del modelado de cámaras de combustión de lecho fijo a escala de laboratorio. Una de sus principales conclusiones fue que el rendimiento de una caldera de lecho compacto se puede establecer mediante la eficiencia de conversión térmica y sus factores emisiones, el primero expresado a través de la tasa de combustión, la velocidad de ignición, la temperatura máxima y el espesor de la zona de reacción; mientras que las emisiones están constituidas por partículas (hollín, partículas orgánicas y partículas de ceniza) y Emisiones gaseosas (H₂O, CO, CO₂, CH₄, NO_x y otros hidrocarburos)

En cuanto a la factibilidad económica, investigadores como (Brigagão et al [11], quienes realizaron un estudio tecno-económico del aumento de la productividad energética a través de la conversión termoquímica de la biomasa en energía. Llegando a la conclusión que, si bien las plantas que usan gasificación tienen un mayor valor monetario en el mercado, las plantas que usan combustión necesitan una menor inversión lo que las hace ideales para lugares apartados, como las zonas no interconectadas sin muchos recursos.

Ndibe et al [12] realizaron un estudio de la adición de biomasa seca en un horno para carbón pulverizado con capacidad de 500 KW un cámara de combustión vertical construida para combustibles pulverizados tales como carbones y biomasa hasta el 50% de la mezcla de combustible. Tomó mediciones de la temperatura del gas y las emisiones de CO, NO_x, SO₂ y HCl. Este estudio demostró la viabilidad operativa de la co-combustión de carbón y biomasa mostrando que las emisiones como NO_x y SO_x pueden reducirse con este método. Por otro lado, investigaciones anteriores [13] consideraron un flujo continuo, enfoque numérico de multifase euleriano, combustible pulverizado, modelo k-epsilon, gravedad vertical y modelo de radiación p-1 en horno de lecho fluidizado llegó a la conclusión que bajos flujos máxicos causan un mayor tiempo de las partículas en el lecho. Si bien el alquitrán residual de la biomasa y el carbón son parecidos, estos son disimilares físicamente en el área de superficie, forma, tamaño, conductividad térmica, densidad y porosidad [14].

Por esta razón, es de gran importancia el lograr entender de manera adecuada los fenómenos que se presentan durante la operación de estos equipos. En consecuencia, el uso de ayudas computacionales como CFD y los modelamientos numéricos han ganado relevancia en los estudios y análisis de los diferentes procesos como el de co-combustión para disminuir su incertidumbre. Teniendo en cuenta todo lo mencionado, este proyecto busca modelar, discretizar y simular mediante el uso de CFD la co-combustión de carbón y tusa de maíz en una cámara de combustión de lecho fijo, con el fin de medir el efecto en la reducción de emisiones Sox, Nox, CO2 y HC. Así mismo, validar estos resultados con la literatura.

2. Metodología

En este trabajo se modela una cámara de combustión piloto para combustible pulverizado en condiciones estacionarias.

2.1 Caracterización de la biomasa y el carbón

Los Analisis proximos y elementales se realizaron en base seca usando la norma ASTM D7582-12

Tabla 1. Análisis próximo de la tusa de maíz.

Análisis próximo de la tusa de maiz	
Humedad Relativa	10.52 %
Carbono Fijo	16.54%
Material volatil	65.23%
Cenizas	7.71%
Poder calorifico	15876.34 KJ/Kg

Tabla 2. Análisis elemental de la tusa de maíz .

Análisis elemental de la tusa de maiz	
C	39.53
H	4.97
O	47.42
N	0.6
S	7.71

Tabla 3. Análisis próximo del carbón

Análisis proximo del carbón	
Humedad Relativa	12.52
Carbono Fijo	40
Material Volatil	43.54
Cenizas	3.93
Poder calorifico	23.911 KJ7Kg

Tabla 4. Analisis elemental del carbón

Analisis elemental del carbón	
C	60.29
H	4.61
O	1.47
N	15.6
S	1.55

2.2 Modelo matemático que describe la co-combustión de carbón y biomasa

2.2.1 Ecuación de balance de la masa

La ecuación (1) establece que la masa se conserva durante el proceso

$$\frac{\partial}{\partial t} + \nabla \rho v = 0 \tag{1}$$

Donde ρ es densidad y v es el vector de velocidad.

2.2.2 Ecuación de momento

La ecuación (2) de momento y energía establece la base para el desarrollo de los CFD basados en modelos matemáticos. Tiene en cuenta las ecuaciones de Navier-Stokes la cual es el momento de conservación.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla (\rho v) = \nabla \tau - \nabla P - \rho \delta \tag{2}$$

Donde ∇P es el gradiente de presión estática, δ es la gravedad y τ es el esfuerzo cortante.

2.2.3 Ecuación de balance de energía

La ecuación (3) lo describe como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla = \nabla \left[\frac{\lambda}{c_p} \left(\sum_{\lambda=1}^{N_s} \left(\frac{\rho D_{\lambda} c_p}{k} - 1 \right) h_{\lambda} \nabla m_{\lambda} + \nabla h \right) \right] \tag{3}$$

Donde h es la entalpia especifica, λ la conductividad térmica, c_p el calor especifico, N_s el número de especies, D_{λ} el coeficiente de difusión y m_{λ} la fracción de masa de las especies.

2.2.4 Ecuación de estado

La ecuación (4) describe la relación entre la temperatura, la presión y la densidad del fluido

$$\rho = \frac{p * M}{R * T} \tag{4}$$

2.2.5 Ecuación de transporte de especies

Como se muestra en la ecuación (5)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho g_k) + \nabla(\rho v g_k) = \nabla(\rho D_k g_k) + S_k \quad (5)$$

Donde S_k es el termino de especies

2.3 Modelo de reacción solido-gas.

2.3.1 Modelo de devolatilización

2.3.1.1 Reacciones homogéneas y heterogéneas.

El proceso de devolatilización de un sólido libera volátiles y char, lo cual se conoce como reacciones homogéneas.

Tabla 5. Reacciones

Reacciones químicas en el proceso	
$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	R1
$CO \rightarrow CO + 1/2 O_2$	R2
$CH_4 + 3/2 O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$	R3
$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	R4
$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	R5
$H_2S + 3/2 O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$	R6
$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$	R7

2.3.2 Desvolatilización

Si bien los procesos en la co-combustión son muy complejos, se puede realizar una aproximación simplificada con la ecuación de Arrhenius la cual asume que hay un gran número de reacciones de descomposición, cada una con sus propios parámetros de cinética[14].

La tasa de reacción cinética k es expresada como se muestra en la ecuación (6):

$$K = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

Donde A es el factor de frecuencia, E_a es la energía de activación, R es la constante universal de los gases y T la temperatura absoluta inicial.

La fracción de conversión, puede ser definida como se muestra en la ecuación (7)

$$\alpha = \frac{m_o - m}{m_o - m_f} \quad (7)$$

Donde α es la conversión, m_o es la masa inicial, m es la masa en cualquier instante del proceso y m_f es la masa al final del proceso.

Teniendo en cuenta que el comportamiento cinético puede ser descrito como se muestra en la ecuación (8):

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (8)$$

Entonces reemplazando k como se muestra en la ecuación (9)

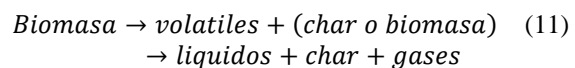
$$\frac{d\alpha}{dt} = A e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)} f(\alpha) \quad (9)$$

Que también puede ser escrita como se muestra en la ecuación (10):

$$\beta \frac{d\alpha}{dt} = A e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)} f(\alpha) \quad (10)$$

Siendo β la tasa de calentamiento ($^{\circ}C/min$) [15].

El proceso de desvolatilización inicia cuando la temperatura de la biomasa alcanza niveles críticos [14] Haga clic o pulse aquí para escribir texto.. Puede ser presentado como se muestra en la ecuación (11):



Existen varios modelos de devolatilización en los cuales ANSYS Fluent ha sido usado, como lo son el modelo CPD, modelo Kobayashi, modelo de tasa de devolatilización constante y el modelo de constante de velocidad única.[16].

En este trabajo es usado el modelo constante de velocidad única o “Single Kinetic Rate Model”, en la cual la tasa de devolatilización depende de la temperatura de la partícula. Se eligió debido a que es el más popular y ampliamente usado en la literatura para predecir la devolatilización. Se define como se muestra en la ecuación (12):

$$-\frac{dm_p}{dt} = K[m_p - (1 - f_{v,0})m_p] \quad (12)$$

Donde $f_{v,0}$ es la fracción inicial volátil y m_p es la partícula de masa de la biomasa.

2.4 Modelo de combustión heterogéneo

Después de que termina la fase de devolatilización, la superficie de las partículas de carbón fijo remanentes empieza a reaccionar con los gases, lo cual oxida el carbón y lo convierte en CO. Por otra parte, los modelos hechos sobre la oxidación del carbono consideran que las partículas son granos esféricos porosos. Además, establecen que se deben tomar en cuenta condiciones locales de combustión, las reacciones en la superficie de las partículas, la reactividad de los combustibles, así como la tasa de difusión[18].

Por otra parte, la difusión del oxígeno hacia la superficie externa de las partículas, se convierte en el factor principal que controla la velocidad de las temperaturas por encima de 1823 [K]. Para temperaturas inferiores a 773 [K], las reacciones químicas manejan la velocidad de reacción de la superficie. Para temperaturas superiores a 1005 [K] los efectos de difusión se vuelven importantes, controlando velocidad de reacción[17]. Con el fin de incluir los dos fenómenos, se usó "The Smith's intrinsic model:" el cual lo describe las ecuaciones (13),(14), (15) y (16). Este modelo asume que la superficie de reacción es determinada ya sea por la cinética o la tasa de difusión. La tasa de difusión está dada por la ecuación (13):

$$D_o = C_1 \frac{(T_p + T_\infty)^{0.75}}{d_p} \quad (13)$$

La tasa de reacción es controlada por la difusión cinética y oxidante, entonces la tasa de reacción es definida como se muestra en la ecuación (14):

$$R_1 = C_2 e^{-\left(\frac{E}{RT_p}\right)} \quad (14)$$

Mientras de tasa de combustión del carbono está dada por la ecuación (15):

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p P_{ox} \frac{D_o R}{D_o + R} \quad (15)$$

Donde D_o es el coeficiente de difusión, d_p es el diámetro de la partícula, R la tasa de reacción, P_{ox} es la presión parcial de las especies oxidantes del gas que rodea la partícula, A_p es el área de superficie de la partícula esférica, T_p es la temperatura de la partícula, T_∞ es la temperatura promedio, C_1 es la constante de difusión de masa y C_2 es la tasa de reacción con factor pre-exponencial [16].

2.5 Modelo de turbulencia

2.5.1 Aproximación numérica

Si bien existen varias aproximaciones numéricas de turbulencia como el método LES que ofrece un entendimiento a larga escala de los fenómenos de turbulencia este consume un esfuerzo computacional grande. mientras que el modelo DNS presenta una alta exactitud, pero todavía no permite estudiar los fenómenos en hornos o cámaras de combustión. El método RANS al ser ampliamente usado por su relación exactitud-costo computacional es el usado para este trabajo.

2.5.2 Modelo Standard K-ε

El modelo k-ε el cual es el más usado en la literatura, y se ha demostrado que es capaz de representar los fenómenos turbulentos en CFD. Este modelo toma en cuenta dos ecuaciones de transporte, k para la energía cinética turbulenta y ε como tasa de disipación y cuyo objetivo es hallar el esfuerzo de Reynolds

2.6 Transferencia de calor

Las altas temperaturas presentes en el proceso de co-combustión llevan a que la transferencia de calor por radiación sea la principal forma de transferencia de calor en la mayoría de los hornos. La ecuación de transferencia por radiación describe el transporte de energía acoplado los fenómenos químicos, de turbulencia y combustión[16]. Es definida como se muestra en la ecuación (16):

$$\frac{dI(r, s)}{ds} = -(k + \sigma_s)I(r, s) + kn^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s') \psi(s, s') d\Omega' \quad (16)$$

Donde r es el vector de posición, s el vector de dirección, I la intensidad de radiación, n el índice refractivo, σ el coeficiente de dispersión, s' el vector de dispersión, k el coeficiente de absorción y Ω' el ángulo sólido.

Sin embargo, encontrar una solución directa a esta ecuación no es posible, FLUENT ofrece varios modelos de radiación, para este trabajo se elige el modelo DO, el cual resuelve la ecuación de transferencia de calor para un numero finito tridimensionales de ángulos[9].

2.7. Movimiento de la partícula

2.7.1 Modelo Euler-Lagrange

Las partículas al entrar a la cámara de combustión siguen su propia trayectoria y son modeladas en un esquema Lagrangiano teniendo en cuenta un conjunto de partícula finito y que estas presentan un efecto en la colisión y las fuerzas que actúan sobre ellas [14].

La fase fluida es tomada como un flujo continuo a través del desarrollo de las ecuaciones de Navier-Stokes en el tiempo, mientras que la fase dispersa es resuelta siguiendo un gran número de partículas y remolinos que son tratados individualmente.

La trayectoria de cada partícula está dada por la ecuación (17):

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (17)$$

Donde $F_D(u - u_p)$ es la fuerza de arrastre por unidad de partícula definida por la ecuación (18)

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D R_e}{24} \quad (18)$$

Donde u es la velocidad de fluido de fase, u_p es la velocidad de partícula, μ es la viscosidad molecular del fluido, ρ_p es la densidad de partícula, D_p es el diámetro de la partícula, R_e es el número relativo de Reynolds y C_D es el coeficiente de arrastre, siendo los últimos dos definidos por la ecuación (19) y la ecuación (20)

$$R_e = \frac{\rho D_p | -u + u_p |}{\mu} \quad (19)$$

$$C_D = \frac{24}{R_e} (1 + b_1 R_e^{b_1}) \frac{b_3}{b_3 + R_e} \quad (20)$$

Para caracterizar los tamaños y distribución de partícula de los combustibles se usó el método de Rosin-Rammler como se observa en la ecuación (1) y se muestra en la tabla xx. Además, la forma de la partícula fue asumida esférica como se evidencia en la ecuación (21)

$$Y_d = \exp\left(-\left(\frac{d_p}{d_e}\right)^\gamma\right) \quad (21)$$

Donde d_e es el diámetro promedio, γ es el factor de dispersión.

2.8 Modelo de interacción de la turbulencia con las reacciones químicas

Para la combustión de carbón pulverizado, ha sido demostrado que los volátiles se queman muy rápido en la zona cerca al quemador, es por esto que se usó “Eddy dissipation model”, el cual utiliza la tasa de disipación de remolinos que contienen reactivos y productos para determinar las tasas de reacción. El método calcula las tasas de reacción, en función de las tasas de mezcla turbulenta[9].

2.9 Mezclas

Son las cantidades o porcentajes de materia prima que componen en combustible en cada simulación. Para este trabajo de uso in máximo de biomasa de 20% por recomendación de la literatura.

Tabla 6. Mezclas usadas.

Mezclas usadas		
Mezcla	% carbon	% biomasa
P1	100	-
P2	95	5
P3	90	10
P4	85	15
P5	80	20

3. Resultados

Realizados los cálculos de la cámara de combustión mediante la modelización numérica en CFD, se obtuvieron resultados en forma de distribuciones de parámetros clave tales como velocidad, temperatura del gas dentro del horno, además de las emisiones. Las Figuras 1, 2 y 3 muestran los mapas de contorno característicos, de los cuales se pueden analizar los resultados, dando así la oportunidad de realizar un análisis cualitativo del proceso de combustión en el interior de la caldera. La Figura 1 muestra el contorno de la magnitud de la velocidad, en la cual se aprecia que esta es mayor a la entrada del combustible y se va diluyendo hasta alcanzar una velocidad uniforme en la cámara de combustión. Este mapa de contorno es similar para todas las mezclas. La distribución de velocidades obtenida señala lugares dentro de la caldera, donde la velocidad de los gases de combustión es muy baja y donde puede comenzar el proceso de deposición de partículas.

En la figura 2 se puede apreciar el mapa de contorno de la temperatura de los gases para la mezcla 1, la cual alcanza cerca de los quemadores valores cercanos a los 1900 [K], sin embargo luego se estabiliza a valores cercanos a los 1100 [K] al acercarse a la salida.

En la tabla 7 se pueden apreciar los resultados de las emisiones cuando se quema solo carbón pulverizado

Tabla 7. Resultados mezcla P1.

Resultados mezcla P1		
Flujo masico de aire	0.185	Kg/s
flujo combustible	0.02907	Kg/s
CO2 fracción másica	0.1751	Kg/Kg
CO fracción másica	0	Kg/Kg
N2 fracción másica	0.7132	Kg/Kg
O2 fracción másica	0.07294	Kg/Kg
SO2 fracción másica	0.0007818	Kg/Kg
Temperatura salida	1150	°C
temperatura aire	300	°C

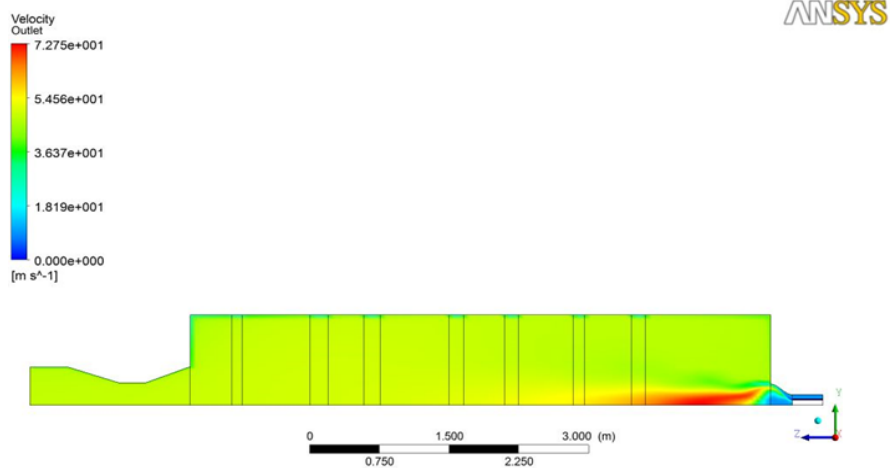


Figura 1. Perfil de velocidad del fluido. Fuente: elaboración propia

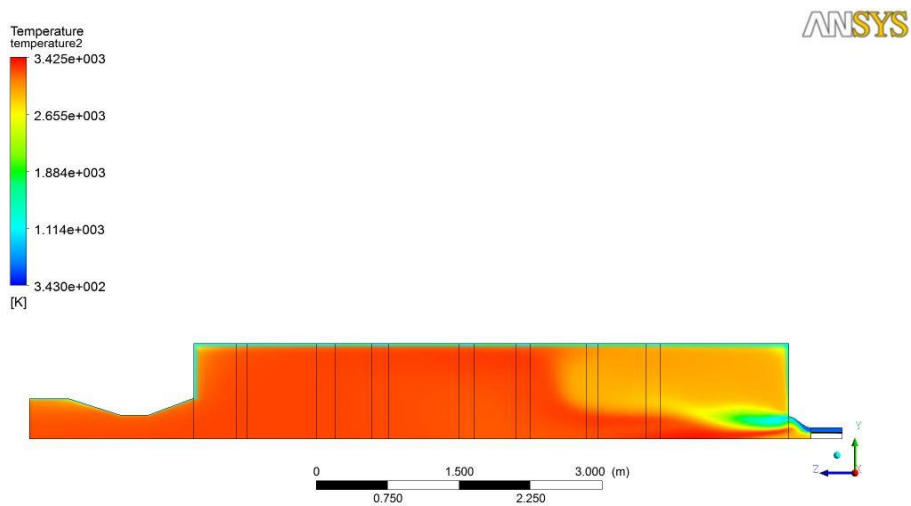


Figura 2. Perfil de temperatura del fluido. Fuente: elaboración propia.

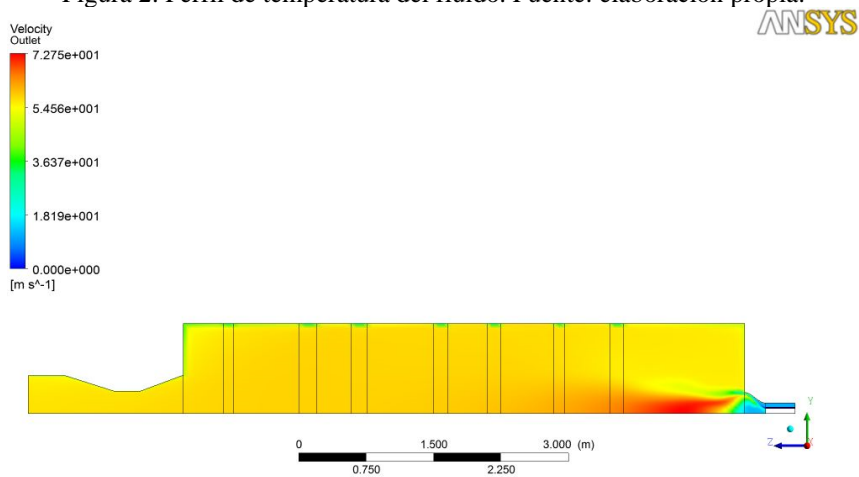


Figura 3. Perfil de velocidad del fluido. Fuente: elaboración propia

A medida de que el porcentaje de biomasa aumenta, como se aprecia en las tablas siguientes la temperatura de salida va disminuyendo, así como las emisiones de Sox y NO, esto debido a la menor cantidad de azufre y nitrógeno presente en la biomasa, lo cual era esperado.

Tabla 8. Resultados mezcla P2.

Resultados mezcla P2		
Flujo masico de aire	0.185	Kg/s
flujo combustible	0.02907	Kg/s
CO2 fracción másica	0.168	Kg/Kg
CO fracción másica	0	Kg/Kg
N2 fracción másica	0.635	Kg/Kg
O2 fracción másica	0.06794	Kg/Kg
SO2 fracción másica	0.0007118	Kg/Kg
Temperatura salida	1135	°C
temperatura aire	300	°C

Tabla 9 . Resultados mezcla P3

Resultados mezcla P3		
Flujo masico de aire	0.185	Kg/s
flujo combustible	0.02907	Kg/s
CO2 fracción másica	0.165	Kg/Kg
CO fracción másica	0	Kg/Kg
N2 fracción másica	0.622	Kg/Kg
O2 fracción másica	0.07294	Kg/Kg
SO2 fracción másica	0.0006998	Kg/Kg
Temperatura salida	1128	°C
temperatura aire	300	°C

Tabla 10. Resultados mezcla P4

Resultados mezcla P4		
Flujo masico de aire	0.185	Kg/s
flujo combustible	0.02907	Kg/s
CO2 fracción másica	0.160	Kg/Kg
CO fracción másica	0	Kg/Kg
N2 fracción másica	0.620	Kg/Kg
O2 fracción másica	0.07294	Kg/Kg
SO2 fracción másica	0.000699	Kg/Kg
Temperatura salida	1105	°C
temperatura aire	300	°C

Tabla 11 . Resultados mezcla P5

Resultados mezcla P5		
Flujo masico de aire	0.185	Kg/s
flujo combustible	0.02907	Kg/s
CO2 fracción másica	0.157	Kg/Kg
CO fracción másica	0	Kg/Kg
N2 fracción másica	0.615	Kg/Kg
O2 fracción másica	0.07294	Kg/Kg
SO2 fracción másica	0.000687	Kg/Kg
Temperatura salida	1077	°C
temperatura aire	300	°C

Con respecto al diámetro de las partículas, se puede apreciar que existe una clara influencia del tamaño de las partículas del combustible en el proceso de combustión. Las partículas de carbón y biomasa con el diámetro más pequeño se consumen rápidamente cuando se encuentran cerca de la región de los quemadores. Por otro lado, el proceso de combustión de las partículas con un diámetro mayor, al poder estar más tiempo pueden tener el proceso completo, es decir, el calentamiento de estas, la desvolatilización completa y proceso de combustión de volátiles. Resumiendo, se llega a la conclusión que la combustión de las partículas de combustible más grandes se lleva a cabo en todo el horno. Además, el carbón sin quemar se deposita en el cenicero situado en la parte más baja de la caldera, para así eliminar las partículas de carbón de la caldera con la ceniza de fondo.

4. Conclusiones

En este estudio se realizó un modelo cinético de una partícula de tusa de maíz variando solo las tasas de calentamiento, bajo los mismos parámetros cinéticos. Si bien se recomienda realizar comparaciones tomando en cuenta varias muestras de tusa de maíz, como diferentes parámetros cinéticos, se puede determinar que variando las tasas de calentamiento H , el coeficiente de devolatilización tiene a ir a cero más rápidamente e iniciando la caída a una mayor temperatura. Por otro lado, se debe hacer un análisis más profundo cambiando los tamaños de las partículas, las cuales no fueron tenidas en cuenta en este trabajo, así como la porosidad. Esto con el fin de ajustar mejor el modelo cinético químico.

En la simulación se puede apreciar los lugares donde se registran las temperaturas y velocidades más altas, así como la conducta de las partículas de las emisiones. Se puede concluir que las emisiones de la combustión realizada dependen significativamente de la composición del combustible de biomasa. En

general, la co-combustión del carbon con tusa de maiz reduce las emisiones de SOx y NOx. En el horno definido, la co-combustión de biomasa y carbón tiene lugar alrededor de la corriente principal de combustible inyectado. La temperatura máxima alcanza un valor de alrededor de 1900 K, lo que provoca un valor más bajo de NOx en los gases de escape. Por otro lado, la temperatura debe disminuirse con una mayor cantidad de aire primario o una menor tasa de flujo másico de ambos combustibles.

También se puede concluir, que las partículas de carbón se queman más rápido que las partículas de biomasa debido al mayor contenido de humedad y poder calorífico. La simulación de la combustión conjunta de biomasa y carbón ha demostrado una influencia significativa de las condiciones de entrada en el proceso de combustión. El desperdicio de partículas que no hicieron combustión se puede mejorar alimentando un flujo másico más bajo hace que las partículas de combustible permanezcan más tiempo en el lecho. En el caso considerado el horno debe tener mayor longitud y mayor diámetro para poder quemar todos los combustibles y homogeneizar la carga o el caudal másico tanto de combustibles como de aire en las entradas debe ser menor. Por último, el enfoque utilizado para la modelación y solución de este proceso puede ser usada en diferentes tipos de configuraciones en los cuales estén presentes procesos de co-combustión con combustibles en diferentes fases, llevando a cabo modificaciones menores. Esto debido a que los software CFD ofrecen configuraciones y constantes predeterminadas que deben ser modificadas por funciones definidas por el usuario para atender las aplicaciones industriales específicas bajo consideración

5. Referencias

- [1] ONU. (2021). <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>.
- [2] Mesa, M. D., viceministro, P., Lotero, M., Rafael, C., subdirectora De Demanda, J., Escobar, L., Subdirectora De Hidrocarburos, R., Cruz, C., Subdirector, C., Eléctrica, E., Martínez, J., de Minería, S., Viana, R., Leonardo, G., Julieth, C., García, S., Francisco, J., William, M., Martínez, A., ... Morillo, J. L. (2020). Plan energético nacional 2020-2050.
- [3] Fedepalma. (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite* Biomass Combustion: Concepts, Technologies and Applications in the Oil Palm Agroindustry. In Revista Palmas. Bogotá (Colombia) vol (Vol. 39, Issue 4).
- [4] Berastegui Barranco, C., & Ortega Rodríguez, J. P. (2016). elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tres biomazas residuales, tres tipos de bioaglomerante y carbón mineral del departamento De Córdoba. Universidad de Cordoba.
- [5] Pinto, C., dias, M., & tavares, C. (2003). . Effect of experimental conditions on co-gasification of coal, biomass and plastics wastes with air/steam mixtures in a fluidized bed system.
- [6] Tillman, D, Duong, D, Harding, N. Solid Fuel Blending: Principles, Practices, and Problems. 2012
- [7] Pennington, D. (2020). Bioenergy crops. Bioenergy: Biomass to Biofuels and Waste to Energy, 133–155. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815497-7.00007-5>
- [8] Barnes, D. I. (2015). Understanding pulverised coal, biomass and waste combustion - A brief overview. *Applied Thermal Engineering*, 74, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.057>
- [9] Pérez-Jeldres, R., Cornejo, P., Flores, M., Gordon, A., & García, X. (2017). A modeling approach to co-firing biomass/coal blends in pulverized coal utility boilers: Synergistic effects and emissions profiles. *Energy*, 120, 663–674. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.116>
- [10] Khodaei, H., Al-Abdeli, Y. M., Guzzomi, F., & Yeoh, G. H. (2015). An overview of processes and considerations in the modelling of fixed-bed biomass combustion. In *Energy* (Vol. 88, pp. 946–972). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.099>
- [11] Brigagão, G. V., de Queiroz Fernandes Araújo, O., de Medeiros, J. L., Mikulcic, H., & Duic, N. (2019). A techno-economic analysis of thermochemical pathways for corn-cob-to-energy: Fast pyrolysis to bio-oil, gasification to methanol and combustion to electricity. *Fuel Processing Technology*, 193, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.05.011>
- [12] Ndibe, C., Grathwohl, S., Paneru, M., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2015). Emissions reduction and deposits characteristics during cofiring of high shares of torrefied biomass in a 500 kW pulverized coal furnace. *Fuel*, 156, 177–189. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.017>
- [13] Mitianiec W. (2016). Co-Combustion Of Pulverized Coal And Biomass In Fluidized Bed Of Furnace. <https://www.researchgate.net/publication/308795603>
- [14] Kumar, H., Mohapatra, S. K., & Singh, R. I. (2018). Review on CFD Modelling of Fluidized Bed Combustion Systems based on Biomass and Co-firing. In *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C* (Vol. 99, Issue 4,

- pp. 449–474). Springer.
<https://doi.org/10.1007/s40032-017-0361-2>
- [15] Liew, J. X., Loy, A. C. M., Chin, B. L. F., AlNouss, A., Shahbaz, M., Al-Ansari, T., Govindan, R., & Chai, Y. H. (2021). Synergistic effects of catalytic co-pyrolysis of corn cob and HDPE waste mixtures using weight average global process model. *Renewable Energy*, 170, 948–963.
- [16] Katarzyna, T., & Stęchły, S. (2019). *CFD modelling of pulverised coal and biomass combustion*.
- [17] Torresi, M., Fortunato, B., Camporeale, S. M., & Saponaro, A. (2012). CFD modeling of pulverized coal combustion in an industrial burner. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 1, 657–666. <https://doi.org/10.1115/GT2012-69506>
- [18] Butterworth-Heinemann. (2013). *The science of Victorian brown coal: structure, properties and consequences for utilization*.
- [19] Hasse, C., Debiagi, P., Wen, X., Hildebrandt, K., Vascellari, M., & Faravelli, T. (2021). Advanced modeling approaches for CFD simulations of coal combustion and gasification. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 86). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2021.100938>
- <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.053>
- [20] Phuakpunk, K., Chalermisinsuwan, B., & Assabumrungrat, S. (2020). Comparison of chemical reaction kinetic models for corn cob pyrolysis. *Energy Reports*, 6, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.08.041>
- [21] Singh, S., Patil, T., Tekade, S. P., Gawande, M. B., & Sawarkar, A. N. (2021). Studies on individual pyrolysis and co-pyrolysis of corn cob and polyethylene: Thermal degradation behavior, possible synergism, kinetics, and thermodynamic analysis. *Science of the Total Environment*, 783. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147004>