

**UTILIZACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL CFD-ANSYS
FLUENT PARA LA SIMULACIÓN DE UN GASIFICADOR**

WILSON RICARDO ROSERO AYALA



**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D. C.
2018**

**UTILIZACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL CFD-ANSYS
FLUENT PARA LA SIMULACIÓN DE UN GASIFICADOR**

**USE OF THE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS CFD-ANSYS FLUENT FOR THE SIMULATION OF
A GASIFIER**

WILSON RICARDO ROSERO AYALA

**TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

DIRECTOR:

Dr.-Ing. CARLOS ANDRÉS FORERO NUÑEZ

**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D. C.
2018**

RESUMEN

La implementación de sistemas de gasificación de biomasa, como fuente de energía de origen primario, genera combustibles que proceden de recursos renovables, con el fin de disminuir el impacto ambiental causado en las últimas décadas por la utilización de combustibles fósiles. La implementación de nuevas tecnologías como la gasificación aprovechan diferentes residuos con contenidos relevantes de C, H₂, O₂, N₂, en sistemas de cogeneración, con la implementación de un gas de síntesis rico en CO, CO₂ y H₂. Diferentes composiciones reportadas por diversos autores, empleando distintos tipos de biomasa, logran conseguir perfiles de concertaciones mediante la utilización de CFD, en softwares como COMMENT y ANSYS. Además, evalúan distintos parámetros como el tamaño de partícula o la velocidad de entrada de biomasa en el gasificador. Por otro lado, mediante las ecuaciones fenomenológicas, las reacciones reportadas de literatura y aprovechando una herramienta de uso libre como ANSYS-FLUENT versión 19.0, se evalúa, en el presente trabajo, la incidencia de un cambio en parámetros como velocidad y temperatura, en un modelo tridimensional muy parecido al gasificador de plantas térmicas y energías renovables de la universidad nacional, el cual puede tener un comportamiento real.

ABSTRACT

The implementation of biomass gasification systems, as a source of energy of primary origin, generates fuels that come from renewable resources, in order to reduce the environmental impact caused in recent decades by the use of fossil fuels. The implementation of new technologies such as gasification takes advantage of different waste with relevant contents of C, H₂, O₂, N₂, in cogeneration systems, with the implementation of a synthesis gas rich in CO, CO₂ and H₂. Different compositions reported by some authors, using a wide range of biomass, manage to achieve consensus profiles through the use of CFD, in software such as COMMENT and ANSYS. In addition, they evaluate parameters like the particle size or the biomass mass rate in the gasifier. Through the different phenomenology equations, the reported reactions of literature and taking advantage of a free-use tool such as ANSYS-FLUENT version 19.0, the incidence of a change in parameters such as speed and temperature was evaluated in a three-dimensional model very similar to the gasifier of thermal plants and renewal energies of the national university, which can have a real performance.

CONTENIDO

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	5
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	8
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Demanda energética.....	1
1.2. Ventajas de gasificar la biomasa	1
1.3. Dinámica de fluidos computacional.....	1
1.4. Trabajos previos aplicando CFD a procesos de gasificación.....	2
2. OBJETIVOS.....	10
2.1. General.....	10
2.2. Específicos.....	10
3. METODOLOGIA.....	11
3.1. ANSYS FLUENT y la dinámica de fluidos computacional.....	11
3.2. Gasificador a simular	11
3.3. Simulación computacional para el sistema de gasificación	12
3.4. Simulación tridimensional	12
3.5. Enmallado.....	13
3.6. CFD-Fluent	13
3.7. Reacciones involucradas.....	14
3.8. Ecuaciones teóricas base para el análisis	15
3.8.1. Ecuación de continuidad.....	15
3.8.2. Ecuación para la cantidad de movimiento o ecuación de Navier Stokes	15
3.8.3. Ecuación de energía	15
3.8.4. Ecuación de componente	15
3.9. Sensibilidad en la temperatura.....	15
3.10. Sensibilidad en la velocidad de entrada de aire	16
3.11. Parámetros de las pruebas realizadas en el gasificador.....	16
3.12. Condiciones de frontera.....	16
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
4.1. Efecto sobre parámetros de operación.....	17
4.1.1. Cambios en la velocidad a las entradas del sistema.....	17
4.1.2. Cambios en la temperatura.....	17
4.2. Modelo 3D.....	18
4.3. Enmallado.....	18
4.4. Resultados perfiles para la prueba A.....	21
4.5. Perfil de velocidad.....	21
4.6. Perfil de concentraciones	22
4.6.1. Concentración de biomasa.....	22

4.6.2.	Concentración de dióxido de carbono	23
4.6.3.	Concentración de monóxido de carbono	24
4.6.4.	Concentración de H ₂	25
4.7.	Resultados modificando la temperatura en las diferentes pruebas realizadas en el sistema de gasificación	26
4.8.	Resultados modificando la velocidad en las distintas pruebas realizadas en el sistema de gasificación.....	28
5.	CONCLUSIONES.....	30
6.	RECOMENDACIONES	31
7.	AGRADECIMIENTOS	31
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
A.	ANEXOS	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Contornos de los diferentes componentes formados en el gas de síntesis dentro del gasificador de lecho fluidificado (Monteiro et al. 2017)	2
Figura 2:	Esquema de gasificador dual de lecho fijo (Liu, Cattolica, and Seiser 2017).	3
Figura 3	Diferentes flujos recirculados al gasificador; a) 0.0382kg/s, b) 0.0573kg/s, c) 0.0764kg/s (Liu et al. 2017).	3
Figura 4	Modelo del gasificador usado para los diferentes ensayos (Nguyen et al. 2012).	4
Figura 5	Distribución de materia particulado sólido a diferentes intervalos de tiempo (Nguyen et al. 2012)	4
Figura 6	Diseño de la geometría del gasificador (Ismail et al. 2016)	5
Figura 7	Perfiles de concentración molar para los diferentes compuestos en el gas de síntesis (Ismail et al. 2016).	6
Figura 8	Planta piloto para el proceso de gasificación de biomasa: a) alimentación del sistema, b) gasificador de lecho fijo, c) intercambiador de calor, d) filtro, e) condensador, f) tea, g) tanque de almacenado de condensado, h) bomba, i) compresor de aire, j) soplador, k) ventilador (Ismail et al. 2018).	7
Figura 9	Diferentes perfiles para los gases producidos en el gasificador de lecho fijo.....	7
Figura 10	Contornos en fracción másica de la variación de CO en el gasificador (Ramírez Rubio 2010)	8
Figura 11	Contornos en fracción másica de la variación de CO ₂ en el gasificador (Ramírez Rubio 2010)	9
Figura 12	Contornos de temperatura al interior del gasificador en grados Kelvin (Ramírez Rubio 2010)	9
Figura 13	Sistema de gasificación empelado para la simulación (Ramírez Rubio 2010).	12
Figura 14	Estructura tridimensional desarrollada en la geometría de ANSYS FLUENT.....	18
Figura 15	Enmallado en el sistema de gasificación.	19
Figura 16	Especificaciones de flujos en el proceso: A) entrada de biomasa. B) entrada de aire, C) salida de gas de síntesis	20

Figura 17 Perfiles de temperaturas sobre diferentes planos; primer plano de izquierda a derecha situado en plano (y,z), segundo plano situado sobre el eje (y,x), tercer plano forma 3D del gasificador.	21
Figura 18 Perfiles de velocidad axial m/s sobre diferentes planos; primer plano de izquierda a derecha situado en plano (y,z), segundo plano situado sobre el eje (y,x), tercer plano forma 3D del gasificador	22
Figura 19 Perfiles de consumo de material volátil: primer plano de izquierda a derecha situado en el eje (y, z), segundo plano situado sobre el eje (y,x), tercer plano forma 3D del gasificador	23
Figura 20 Perfiles de generación de CO ₂ : primer plano de izquierda a derecha situado en el eje (y, z), segundo plano situado sobre el eje (y,x), tercer plano forma 3D del gasificador	24
Figura 21 Perfiles de generación de CO: primer plano de izquierda a derecha situado en el eje (y, z), segundo plano situado sobre el eje (y,x), tercer plano forma 3D del gasificador	25
Figura 22 Perfiles de generación de CO: primer plano de izquierda a derecha situado en el eje (y, z), segundo plano situado sobre el eje (y,x), tercer plano forma 3D del gasificador	25
Figura 23 Perfiles de temperatura para las pruebas; A) 800k, B) 400k, C) 1350K.....	26
Figura 24: Perfiles para la concentración de material volátil en pruebas ; A) 800k, B) 400k, C) 1350K.....	27
Figura 25 Perfiles para la concentración de CO en pruebas; A) 800k, B) 400k, C) 1350K.....	27
Figura 26 Perfiles para la concentración de CO ₂ en pruebas; A) 800k, B) 400k, C) 1350K.....	27
Figura 27 Perfiles para la concentración de H ₂ en pruebas; A) 800k, B) 400k, C) 1350K.	28
Figura 28 Perfiles de temperaturas para las pruebas; A) 0.12m/s, B1) 0.01m/s, C1) 1m/s.	29
Figura 29 Perfiles para el consumo de material volátil en pruebas; A) 0.12m/s, B1) 0.01m/s, C1) 1m/s.	29
Figura 30 Perfiles de concentración de CO para las pruebas; A) 0.12m/s, B1) 0.01m/s, C1) 1m/s.	29
Figura 31 Perfiles de concentración de CO ₂ en las pruebas; A) 0.12m/s, B1) 0.01m/s, C1) 1m/s.	30
Figura 32 Perfiles de concentración de H ₂ en las pruebas; A) 0.12m/s, B1) 0.01m/s, C1) 1m/s.	30

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Caracterización de cascara de coco (Forero Núñez et al. 2013)	14
Tabla 2: Reacciones involucradas en el modelo de gasificación (Gómez-Barea and Leckner 2010) (Sudiro et al. 2010).....	14
Tabla 3: Pruebas a diferentes condiciones en el sistema de gasificación.....	16
Tabla 4: Condiciones de frontera para el sistema de gasificación	16
Tabla 5: Influencia de la velocidad sobre las ecuaciones fenomenológicas.	17
Tabla 6: Reporte de resultados para el enmallado del sistema	19

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Demanda energética

En la actualidad el aumento del consumo de la energía principalmente de origen no renovable, como la quema de combustibles fósiles ha ocasionado una gran liberación de CO₂, CO, NO_x, SO_x, dando lugar a problemas medio ambientales aumentando el efecto invernadero y provocando el calentamiento global. Estos combustibles fósiles no estarán de forma infinita en la tierra, por lo cual es necesario la implementación de energías alternativas de origen primario con el uso de diferentes tecnologías para el aprovechamiento de estas. Con la generación de combustibles alternativos que procedan de recursos renovables se quiere dar una reducción al impacto ambiental causado en las últimas décadas. Para el 2014 el consumo de las diferentes fuentes de energía fue la siguiente: combustibles fósiles 78,3%, energía nuclear 2,5%, energías renovables modernas 10,3%, biomasa 8,9% (Siglo 2016).

Mediante el uso de una nueva tecnología como la gasificación, se pueden aprovechar diferentes tipos de biomasa o residuos con contenidos relevantes de C, H₂, O₂, N₂, S, para sistemas de cogeneración. En general, el proceso de gasificación tiene las siguientes etapas: calentamiento y secado del material, pirolisis, combustión y una zona de reducción. De esta forma convierte material sólido a un combustible gaseoso que se puede usar para calentamiento, aplicación en procesos industriales, generación de electricidad y producción de combustibles líquidos (Brown 2011).

La biomasa es una materia de origen orgánico renovable, producida por los residuos agrícolas, algunos componentes de desechos municipales e industriales. A diferencia de los combustibles fósiles esta no toma millones de años en formarse, por lo cual es un atractivo para la sustitución a las fuentes de energía provenientes del carbón, utilizando tecnologías como la implementación de gasificadores.

El uso de la biomasa como combustible renovable en procesos de gasificación permite la generación de energía, de tal forma que se disminuye la emisión de CO₂ y SO_x ya que la biomasa tiene en menor proporción compuestos azufrados (Juan Pérez^{1*} and John Agudelo¹ n.d.).

1.2. Ventajas de gasificar la biomasa

La biomasa es considerada como uno de los recursos renovables con mayor potencial para la obtención de combustibles, ya que usa como alimentación los residuos de diferentes procedencias, además, dando valor a estos subproductos tanto agrícolas como industriales, y promoviendo el desarrollo económico (Bridgwater 1995).

La biomasa por medio de tecnologías como gasificadores pueden convertirse en combustibles gaseosos como el gas de síntesis, el cual esta principalmente compuesto por H₂ y CO, sirviendo como materia prima para la producción de metano, biogás y para la elaboración de combustibles líquidos tales como biodiesel; así mismo se utiliza para la generación de electricidad o para la elaboración de compuestos químicos como metanol y amoníaco (FI 2016).

1.3. Dinámica de fluidos computacional

La dinámica de fluidos computacional (CFD, computational fluid dynamics) fue principalmente utilizada en la industria aeronáutica y astronáutica, pero con el tiempo se ha

ampliado su uso en otros sectores industriales. Esto se debe a que la dinámica computacional de los fluidos se da por la combinación de varias asignaturas como mecánica de fluidos y transferencia de calor. Aprovechando esto es posible generar nuevos diseños de sistemas aumentando la eficiencia de los procesos y reduciendo costos, tiempos y pruebas reales (Tu et al. 2013).

1.4. Trabajos previos aplicando CFD a procesos de gasificación

Sistemas de gasificación de biomasa han sido previamente analizados mediante modelos de CFD. Por ejemplo, se ha evaluado la especie vegetal miscanthus en un gasificador semi-industrial, mediante el estudio de CFD para un gasificador de flujo ascendente. Es decir, se utilizó un gasificador en contra corriente donde la alimentación de la biomasa fue en la parte superior y la alimentación del aire fue realizada en la base, y por medio de ecuaciones de masa, momento, especie y mediante la utilización de COMMENT se llevo a cabo el modelamiento bidimensional de componentes como O_2 , CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_4 (Figura 1).

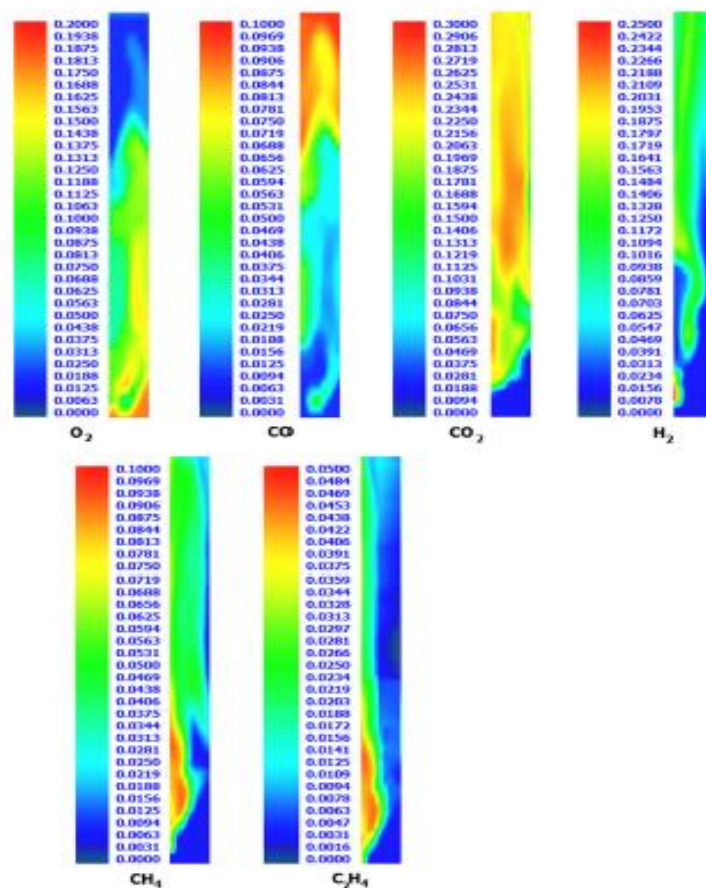


Figura 1 Contornos de los diferentes componentes formados en el gas de síntesis dentro del gasificador de lecho fluidificado (Monteiro et al. 2017)

Los resultados obtenidos de la simulación mostraron que, compuestos como CO , CH_4 , C_2H_4 , tienen perfiles similares ya que se forman más rápidamente después de la combustión de la biomasa. Por otro lado, en este estudio se determinó la influencia de temperaturas altas que favorecen la producción de H_2 , de igual manera a temperaturas más altas en la parte inferior del gasificador se produce más CO_2 , finalmente se observa que el alquitrán producto de la pirolisis se condensa y se deposita en el fondo del

gasificador. La acumulación de este puede obstruir los filtros y las mangueras de entrada de aire (Monteiro et al. 2017).

En un segundo caso de estudio. Se evalúan parámetros de operación en la recirculación de sólidos, mediante una simulación CFD en un sistema de gasificación de lecho fijo dual. El propósito del estudio fue mejorar la forma de la recirculación del sólido (Figura 2).

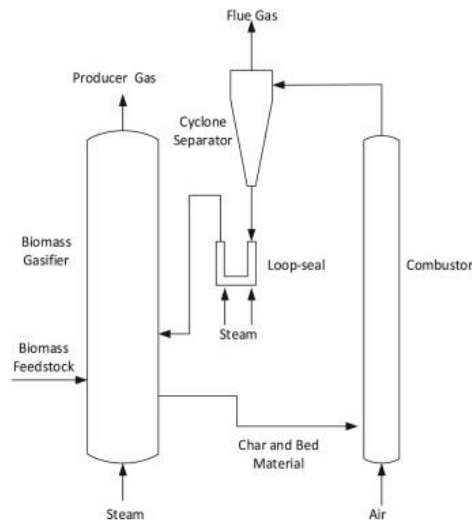


Figura 2: Esquema de gasificador dual de lecho fijo (Liu, Cattolica, and Seiser 2017).

Siguiendo el esquema de la figura 2 y por medio de la variación de diferentes recirculaciones se obtiene los siguientes perfiles de temperatura (Figura 3).

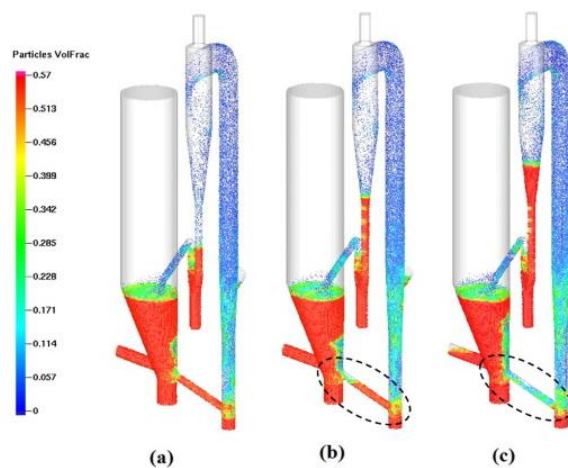


Figura 3 Diferentes flujos recirculados al gasificador; a) 0.0382kg/s, b) 0.0573kg/s, c) 0.0764kg/s (Liu et al. 2017).

Finalmente, en el estudio se concluye que el factor más importante al momento de la circulación es el tamaño de la partícula ya que este aumenta la velocidad de circulación y el proceso de gasificación tiene una mayor eficiencia, sin embargo, el tamaño de la partícula no puede ser menor a 200 micrómetros ya que pasa demasiado rápido la circulación y no se alcanza a quemar la biomasa (Liu et al. 2017).

En otro estudio se utiliza la simulación de CFD para diferentes experimentos en un gasificador de lecho con doble circulación, en este caso se utiliza un modelo bidimensional para identificar el comportamiento estable del gasificador (Figura 4).

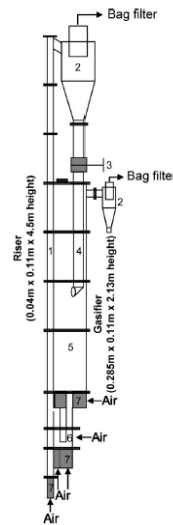


Figura 4 Modelo del gasificador usado para los diferentes ensayos (Nguyen et al. 2012).

Los resultados obtenidos en este estudio incluyen perfiles de temperatura a diferentes tiempos y velocidades para seis experimentos manteniendo constantes la velocidad del aire de entrada y la carga inicial al gasificador (Figura 5).

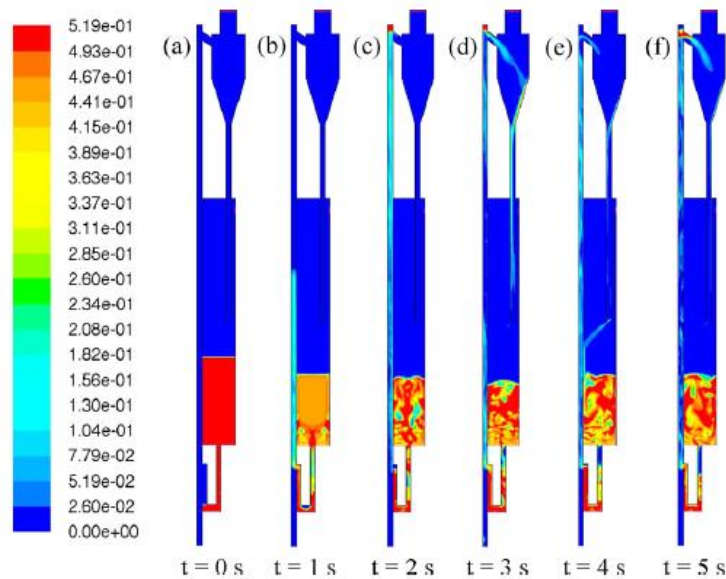


Figura 5 Distribución de materia particulada sólida a diferentes intervalos de tiempo (Nguyen et al. 2012)

De esto se infiere que para el último tiempo el sistema está completamente desarrollado alcanzado un equilibrio en los tiempos de 3 a 5 segundos permitiendo encontrar la velocidad adecuada para la carga del gasificador y así conocer en cuanto tiempo se estabiliza (Nguyen et al. 2012).

Por otro lado, se emplea un modelo Euleriano en CFD de dos dimensiones (Figura 6) para un gasificador de lecho fijo usando cascarilla de café como combustible, con el ánimo de describir el proceso de gasificación. El método euleriano se utiliza para la fase

gaseosa y para la fase sólida resultante, permitiendo ver el comportamiento de intercambio de masa, energía y momentum.

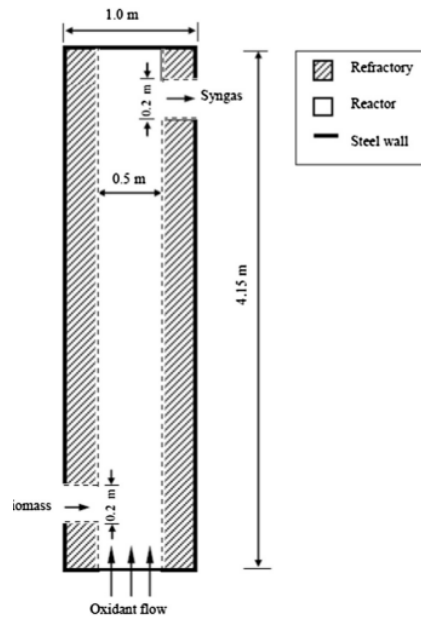


Figura 6 Diseño de la geometría del gasificador (Ismail et al. 2016)

En el desarrollo experimental de este estudio fue utilizado COMMENT-code como software de modelamiento, para desarrollar las ecuaciones de masa, momentum, energía y especies. Así mismo, se incorporo un modelo de apoyo que involucra la teoría cinética del flujo granular obteniendo como resultado los siguientes perfiles de concentraciones en fracción molar (Figura 7).

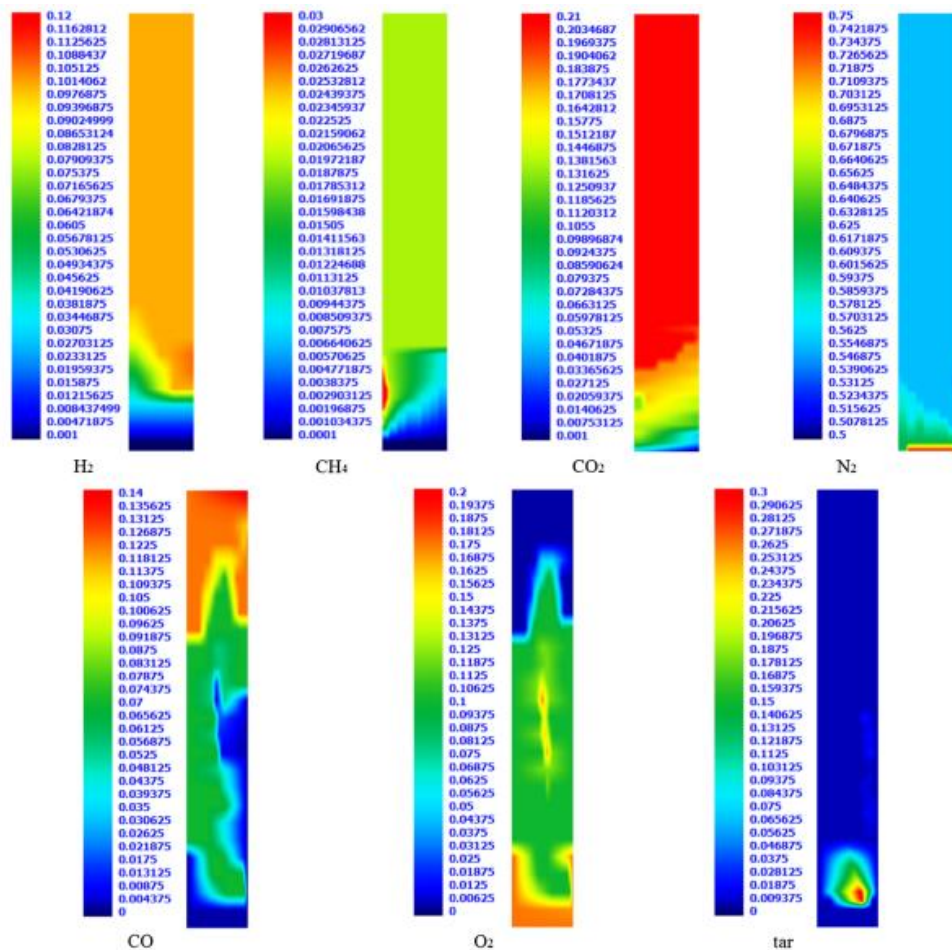


Figura 7 Perfiles de concentración molar para los diferentes compuestos en el gas de síntesis (Ismail et al. 2016).

Cabe resaltar que los anteriores perfiles de resultados (Figura 7) fueron netamente experimentales ya que su alto costo implica un obstáculo para recrearlos en gasificadores industriales. Los resultados anteriores muestran la distribución molar producida en la gasificación, y el contenido del gas de síntesis en compuestos como: H_2 , CH_4 , CO_2 , N_2 , CO , O_2 . De igual forma muestran que como producto de la condensación del material que no reacciona se encuentran los alquitranes. Como se ve en la figura 7, se producen cantidades más altas de CO , CO_2 , después de la combustión donde la mayor fracción molar se acumulan en la parte superior del gasificador. La fracción molar más alta de H_2 se encuentran en la mitad del gasificador ya que en esta zona ocurre la combustión acumulando este gas junto con el CH_4 (Ismail et al. 2016).

En un quinto caso de estudio. Se generan modelos de dinámica de fluidos en un gasificador de lecho fijo utilizando biomasa agroindustrial como combustible. La biomasa utilizada fue la semilla del durazno. Mostrando un potencial energético de los residuos agroindustriales y la optimización de un sistema a escala piloto (Figura 8).

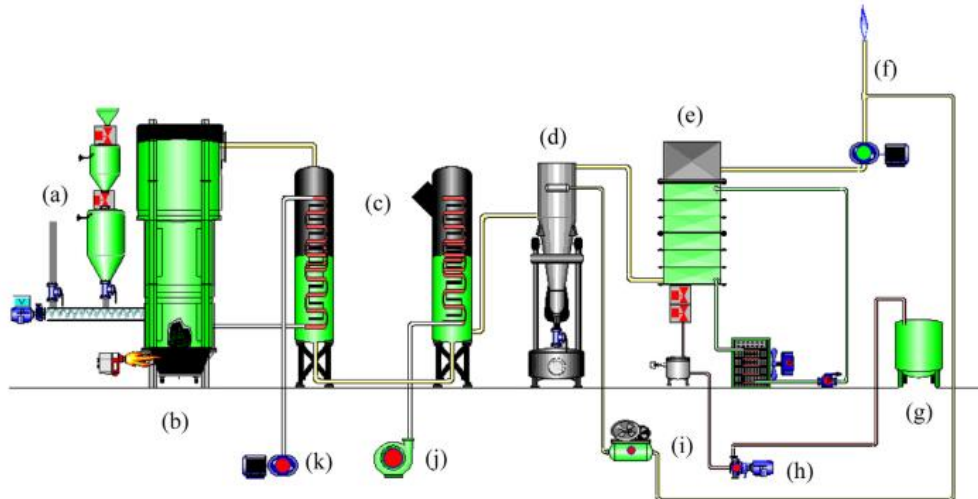


Figura 8 Planta piloto para el proceso de gasificación de biomasa: a) alimentación del sistema, b) gasificador de lecho fijo, c) intercambiador de calor, d) filtro, e) condensador, f) tea, g) tanque de almacenado de condensado, h) bomba, i) compresor de aire, j) soplador, k) ventilador (Ismail et al. 2018).

El modelamiento del sistema de gasificación se lleva a cabo mediante el software COMMENT, con el cual se desarrollan las ecuaciones necesarias para los fenómenos de transporte, dando como resultado un gas de síntesis cuya composición contiene los siguientes gases: H_2 , CO_2 , CO , CH_4 , los cuales muestran perfiles de concentraciones en fracción molar (Figura 9).

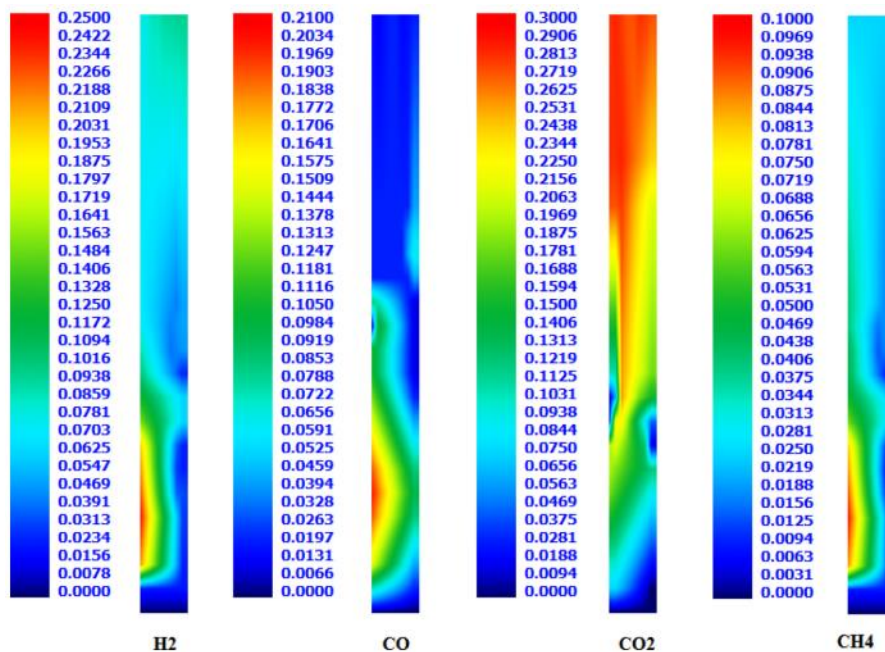


Figura 9 Diferentes perfiles para los gases producidos en el gasificador de lecho fijo

Como resultados finales, en el estudio se demuestra que temperaturas altas contribuyen a la mejor formación de gas de síntesis, esto se debe a que la mayoría de las reacciones requieren energía y la mayoría de esas reacciones son endotérmicas aumentando así con elevadas temperaturas. Estas temperaturas pueden oscilar en un rango de 700 a 1300°C, además, las temperaturas altas no solo ayudan a producir más efectivamente

gas de síntesis, si no que reducen la formación de alquitranes. Temperaturas muy bajas no favorecen el crackeo de la biomasa este es fundamental para la producción de monóxido de carbono (Ismail et al. 2018).

Por último. Se utiliza la simulación computacional en un proceso de gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo (figura 13). En el cual se utilizan diferentes biomazas, sin embargo, se priorizan los resultados obtenidos con carbón vegetal. Este material se caracteriza, se define el tamaño de partícula, y se realizan sus análisis próximos y últimos con el fin de conocer el contenido de C, H, N, O, S, cenizas, volátiles y carbón fijo. Se evalúa la tasa de consumo de carbol vegetal según la variación del caudal de aire.

Posterior a la gasificación se determina la composición de gas de síntesis producido, el cual estaba directamente influenciado por el caudal de aire, por la mejora de las temperaturas en las zonas de combustión y oxido reducción, se reduce el CO_2 a CO . Culminada la parte experimental se procede a comparar los resultado mediante el uso de software ANSYS FLUENT versión 12.0, en la cual se establecen condiciones similares de entradas de biomasa, aire y salida de gas de síntesis en un modelo en dos dimensiones del gasificador del laboratorio de plantas térmicas y energías renovables (figura 13). Obteniendo como resultado contornos para la fracción másica de CO , CO_2 , y un perfil de temperaturas al interior del gasificador (Figura 10, 11, 12 respectivamente).

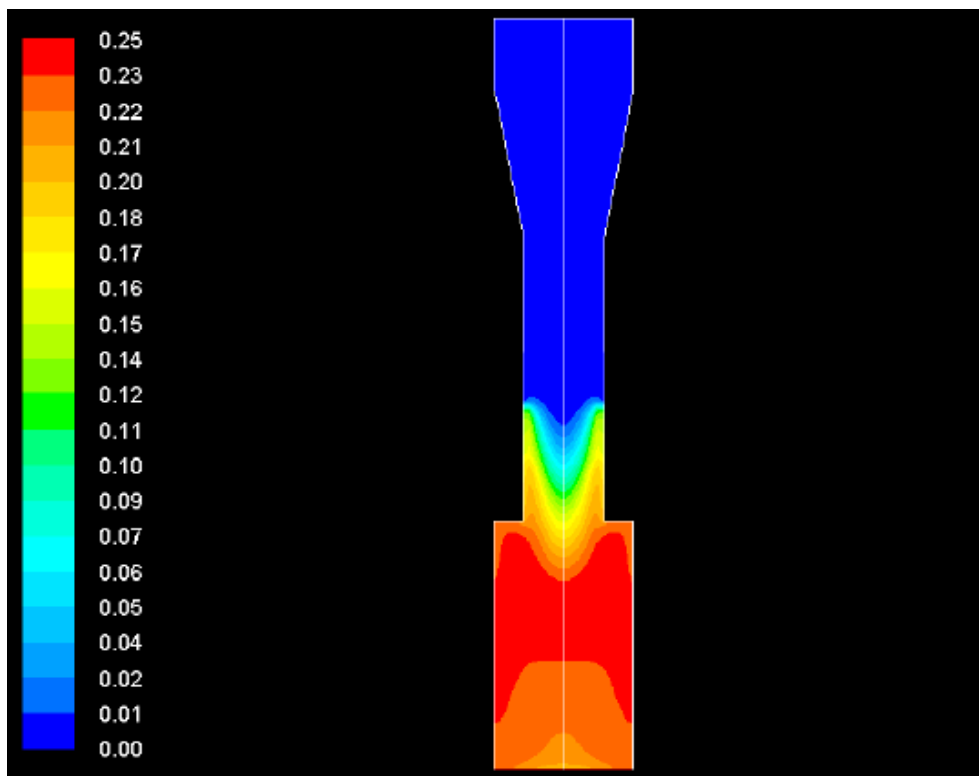


Figura 10 Contornos en fracción másica de la variación de CO en el gasificador (Ramírez Rubio 2010)

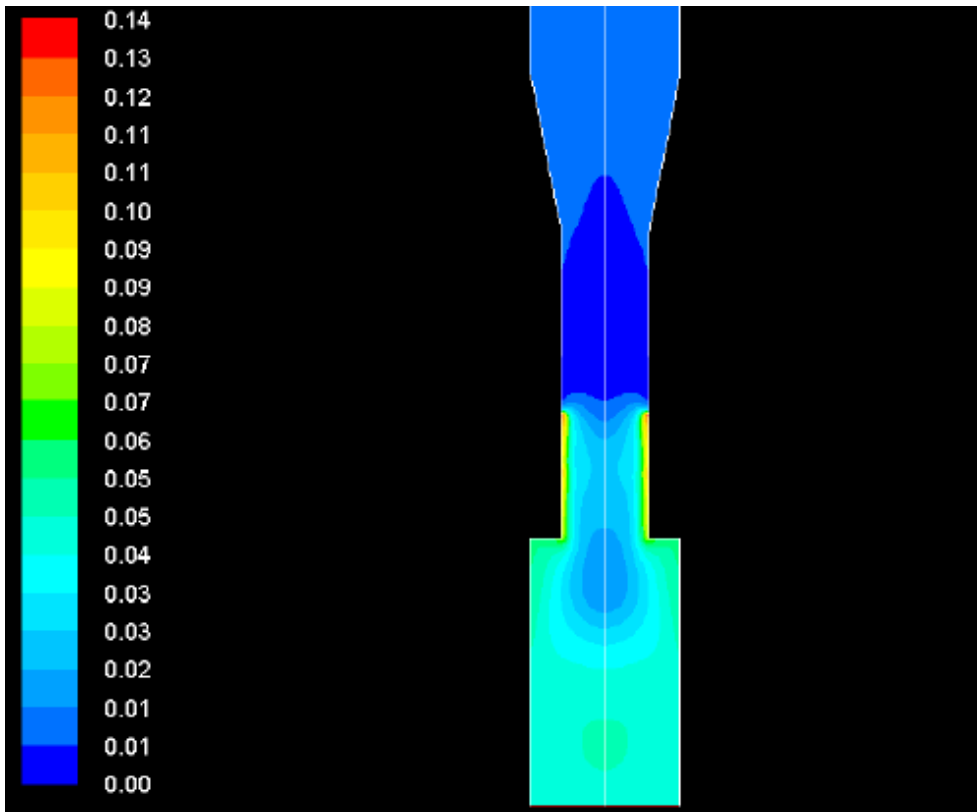


Figura 11 Contornos en fracción másica de la variación de CO₂ en el gasificador (Ramírez Rubio 2010)

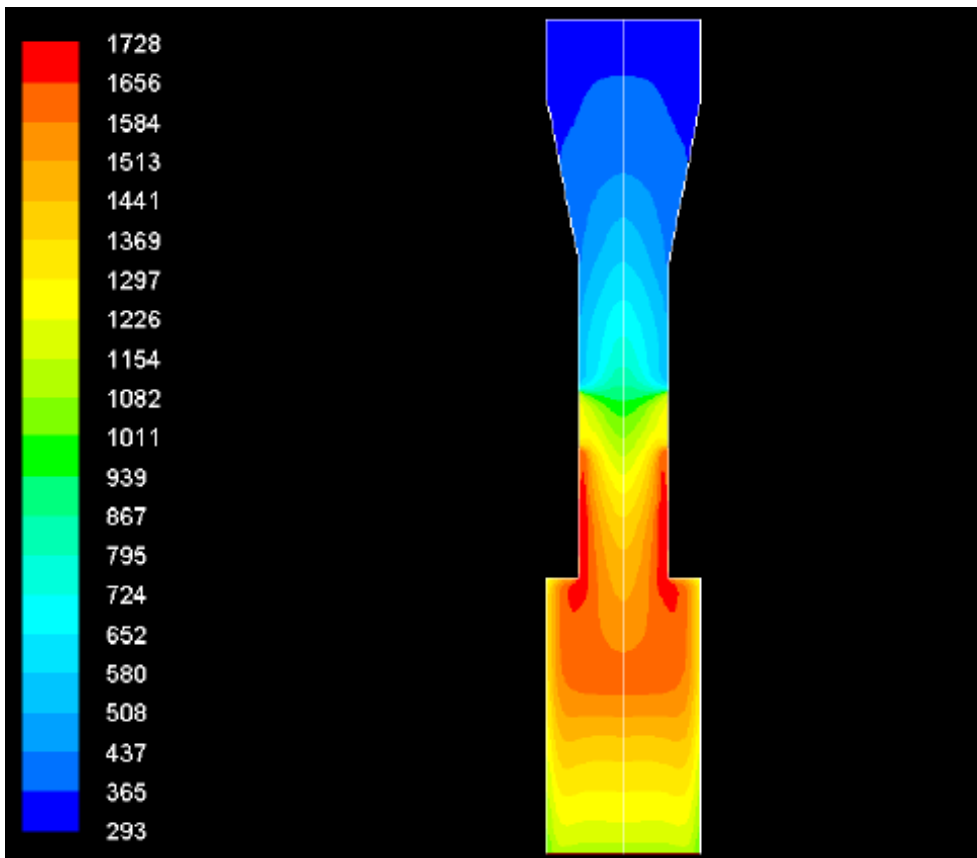


Figura 12 Contornos de temperatura al interior del gasificador en grados Kelvin (Ramírez Rubio 2010)

2. OBJETIVOS

2.1. General

Analizar mediante la herramienta de dinámica de fluidos el comportamiento fenomenológico de un gasificador de lecho fijo corriente descendente

2.2. Específicos

- Identificar la incidencia que tienen los parámetros de operación del gasificador sobre las ecuaciones de continuidad, movimiento, energía y composición.
- Establecer un modelo de simulación para un gasificador de lecho fijo corriente descendente mediante la herramienta ANSYS FLUENT.
- Evaluar el comportamiento de perfil de velocidad, presión, temperatura y composición en dos dimensiones para un gasificador de lecho fijo corriente descendente.

3. METODOLOGIA

3.1. ANSYS FLUENT y la dinámica de fluidos computacional

El uso de software de apoyo como ANSYS FLUENT para la dinámica de fluidos computacional, es de gran importancia para el desarrollo de este trabajo, ya que este software es muy completo para el modelamiento fluido (gas o líquido), de manera dinámica con asignaciones de entradas y salidas; de igual forma el software permite la asignación de reacciones básicas para entender un comportamiento de diferentes composiciones e inclusive optimizar equipos.

Una vez asignadas las variables de entrada y salida del sistema que me permitan modelar la parte interna del mismo, se procede a utilizar una herramienta del paquete de FLUENT de ANSYS. Dicha herramienta se conoce como enmallado, el cuál es posible manipularlo en forma, geometría y distribución de la malla. Terminado el proceso de enmallado del sistema a analizar, es necesario establecer las condiciones de frontera que se presentan en el sistema, aspectos tales como la composición del agente gasificante, parámetros cinéticos de las reacciones de combustión, oxidación y reducción presentes en el proceso de gasificación, velocidad de entrada de las sustancias y flujos de calor al ambiente son requeridos.

3.2. Gasificador a simular

El gasificador empelado para la simulación mediante el software de uso libre para estudiantes ANSYS-FLUENT, fue el equipo ubicado en el laboratorio de plantas térmicas y energías renovables de la universidad Nacional de Colombia, este gasificador se encuentra clasificado como de lecho fijo, donde la parte principal del sistema esta constituido por un reactor cilíndrico de 1.28m de altura y 0.35m de diámetro en donde ocurre la pirolisis, combustión y oxido reducción. En la parte superior se encuentra ubicada una tolva en forma de prisma trapezoidal donde la mayor área es de 0.047m² y la menor área es de 0.023m² la cual se conecta con la parte superior del reactor cilíndrico (Forero Núñez, Castellanos Contreras, and Sierra Vargas 2013).

La alimentación de aire se ubica en la parte central del reactor. El gas de síntesis obtenido posterior a la combustión sale en la parte inferior del reactor (Figura 13).

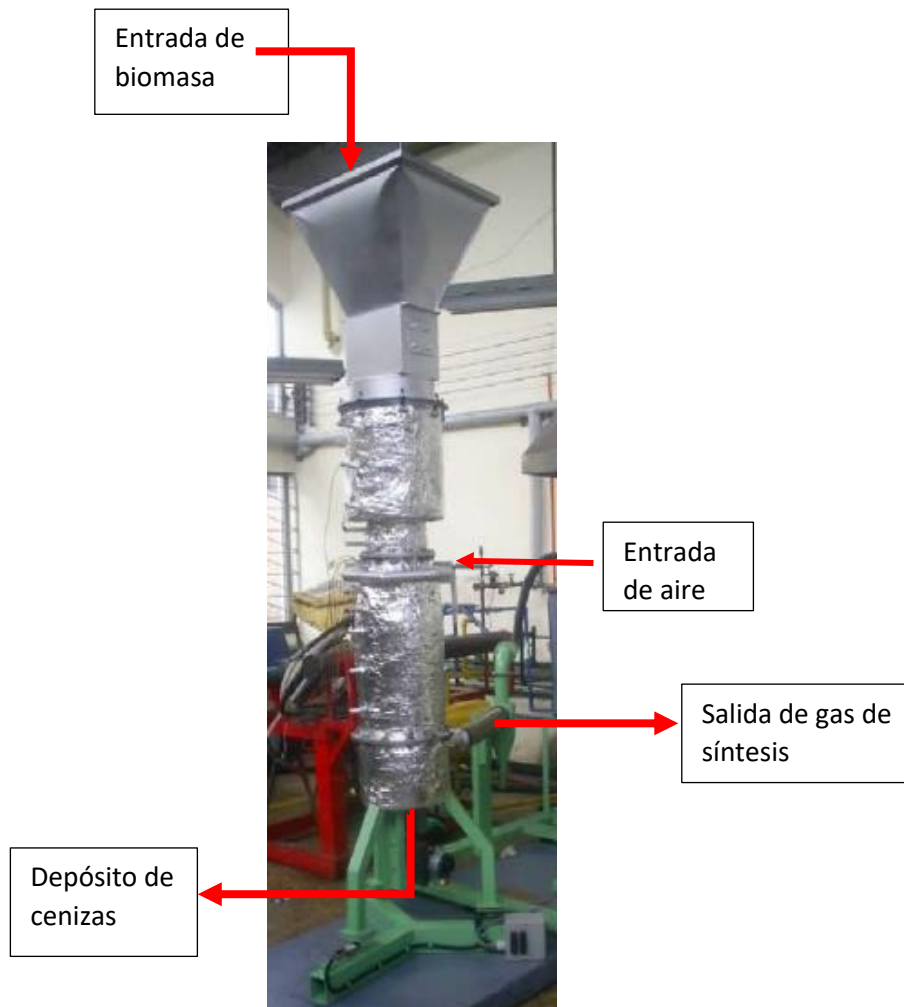


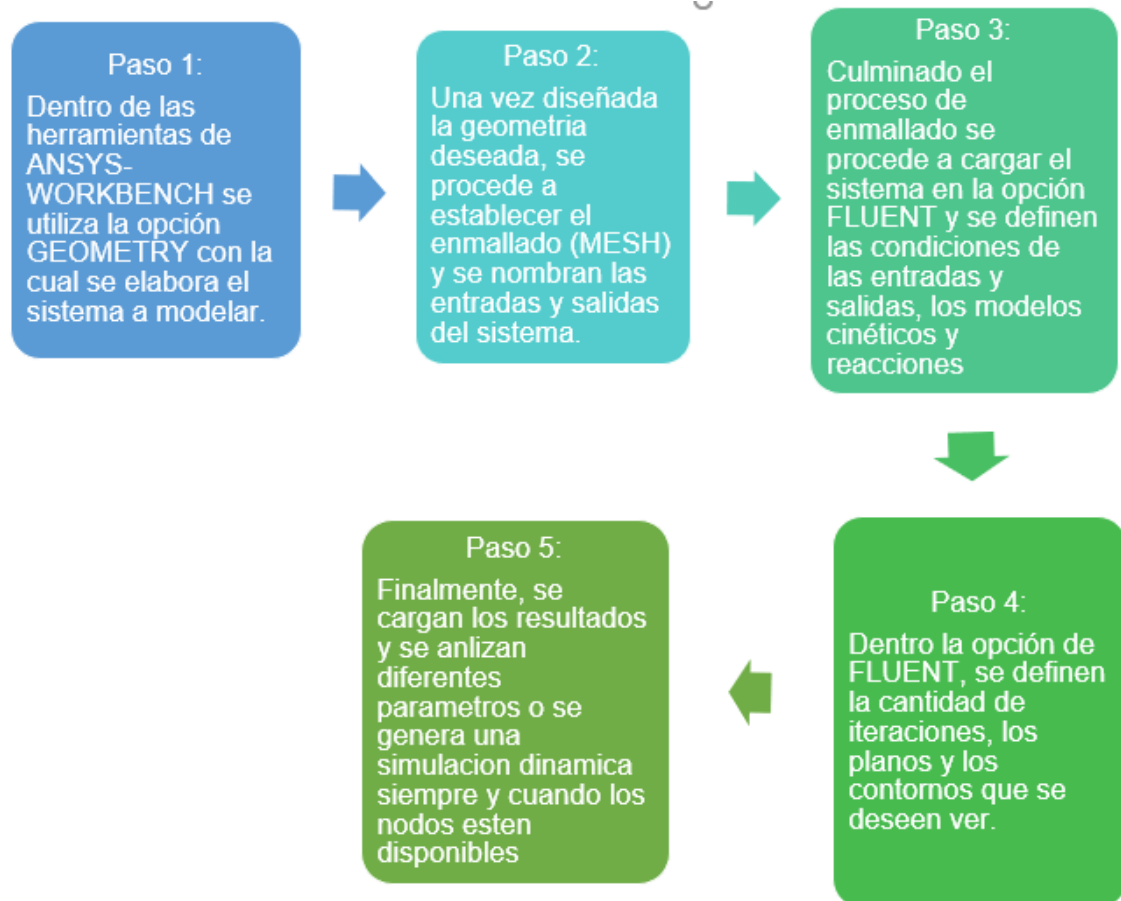
Figura 13 Sistema de gasificación empelado para la simulación (Ramírez Rubio 2010).

3.3. Simulación computacional para el sistema de gasificación

Para llevar a cabo la simulación del gasificador, se emplea el software de uso libre para estudiantes ANSYS en particular el paquete de FLUENT. Este paquete es el más adecuado para el desarrollo de la dinámica de fluidos computacional, permitiendo escoger la caracterización de una biomasa que tiene por defecto, permite modificar reacciones, caracterizar las entradas y salidas del proceso, y muestra los diferentes perfiles de los compuestos obtenidos en el gas de síntesis. La versión utilizada para esta simulación es la 19.0, y la revisión de manuales permiten una mejor comprensión del software para el diseño tridimensional (Remedy and Management 2009), (Kohnke 1999).

3.4. Simulación tridimensional

Para llevar a cabo la simulación de este gasificador, es necesario seguir una serie de pasos que conllevan a un modelo que muestre un comportamiento cercano a la realidad como se presenta en el siguiente esquema.



3.5. Enmallado

Una vez construida la estructura deseada (Figura 13) se prosigue con la definición del enmallado, este es esencial para el desarrollo del proceso de gasificación, ya que ANSYS-FLUENT utiliza el método de volúmenes finitos para el desarrollo de las distintas ecuaciones de masa, momentum, energía y continuidad.

3.6. CFD-Fluent

Culminado el proceso de enmallado se procede a establecer las condiciones en el sistema de gasificación, tales condiciones son:

- Los flujos máxicos para la entrada: de biomasa 0.02kg/s, y de aire 0,14kg/s.
- Los flujos máxicos de salida: una de cenizas 0,0013kg/s, y gas de síntesis 0.14kg/s.
- Caracterización de carbón-volátiles-aire como fuente de biomasa proporcionada por la base de datos de ANSYS, que contenía un análisis de las características para la mezcla (Tabla 1).

Esto se encuentra en la sección de modelamiento de especies, seguido de la opción transporte de especies subsección mezclas de material, en esta pestaña se despliega una serie de mezclas entre combustibles procedentes de hidrocarburos, mezclas de carbón y otros compuestos. Una vez seleccionado el material ANSYS proporciona la primera reacción involucrada en el sistema que se puede ver con más detalle en la sección 2.3.4.

Tabla 1: Caracterización de cascara de coco (Forero Núñez et al. 2013)

Análisis último		Análisis próximo	
C	0,4601	Volátiles	0,7145
H	0,0894	Carbón fijo	0,1528
O	0,4485	Humedad	0,0126
N	0,0016	Cenizas	0,1201
S	0,0003		

Para adicionar las reacciones que completan la gasificación, es necesario ingresar los componentes. Esto es posible al dirigirse en el panel de la simulación, donde se encuentra la ventana de materiales, la cual se despliega con las opciones de crear o editar, una vez allí se recurre a la base de datos de FLUENT y se escoge si el nuevo material es una mezcla de diferentes compuestos o se escoge un material dentro de las opciones predeterminadas de FLUENT el cual se acople mejor a la simulación. En la edición se seleccionan compuestos y se adiciona C, CH₄, H₂, CO, ya que estos no se ven involucrados en el balance de la primera reacción, y son fundamentales para las otras reacciones.

3.7. Reacciones involucradas

Para ingresar las reacciones necesarias para la simulación hay que tener en cuenta la información de sus parámetros cinéticos, ya que únicamente se encuentran los parámetros de la primera reacción, estos proporcionados por la base de datos de ANSYS-FLUENT la cual depende de cada mezcla escogida anteriormente. Para encontrar los parámetros cinéticos de cada reacción se recurre a datos experimentales (Tabla 2) y se deja en unidades consistentes para ingresarlas al modelo.

Tabla 2: Reacciones involucradas en el modelo de gasificación (Gómez-Barea and Leckner 2010) (Sudiro et al. 2010).

Numero de reacción	Reacción	A	Ea (J/kmol)
1	Biomasa + 0.72821O ₂ → 0.8609CO + 1.6156H ₂ O + 0.0020N ₂ + 0.0003SO ₂	2.119e+11	2.027e+08
2	CO + 0.5O ₂ → CO ₂	2.239e+12	1.7e+08
3	CO + H ₂ O → H ₂ + CO ₂	1.35e+09	6.069e+10
4	H ₂ + O ₂ → H ₂ O	3.09e+14	9.98e+07
5	CH ₄ + O ₂ → CO + H ₂ O	2.8e+09	2.03e+11
6	CH ₄ + H ₂ O → CO + H ₂	3e+08	1.25e+11
7	C + CO ₂ → 2CO	3.419	129.70e+03
8	C + H ₂ O → CO + H ₂	208	2.4e+08
9	C + H ₂ → CH ₄	2083	2.3027e+08

3.8. Ecuaciones teóricas base para el análisis

Las ecuaciones necesarias para desarrollar cualquier modelo en el espacio de ANSYS-FLUENT, parten de los balances de materia y energía, en los diferentes volúmenes finitos generados por el enmallado del sistema, las cuales se presentan a continuación;

3.8.1. Ecuación de continuidad

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho \frac{\partial v_y}{\partial y} + \rho \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

3.8.2. Ecuación para la cantidad de movimiento o ecuación de Navier Stokes

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] + \rho g \quad (2)$$

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] + \rho g \quad (3)$$

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho g \quad (4)$$

3.8.3. Ecuación de energía

$$\rho C_p \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - r_h \quad (5)$$

3.8.4. Ecuación de componente

$$\rho \left(v_x \frac{\partial \omega_a}{\partial x} + v_y \frac{\partial \omega_a}{\partial y} + v_z \frac{\partial \omega_a}{\partial z} \right) = \rho D_{AB} \left(\frac{\partial^2 \omega_a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_a}{\partial z^2} \right) - r_a \quad (6)$$

3.9. Sensibilidad en la temperatura

La temperatura es un factor importante, puesto que este determina la composición del gas de síntesis. A temperaturas elevadas aumentan las condiciones de reactividad incrementando la formación de diferentes gases deseados. Los cuales son necesarios para completar las reacciones impidiendo alcanzar el resto del material volátil, dificultando la formación de un óptimo gas de síntesis puesto que únicamente se tocará la superficie externa de la biomasa. Por otro lado, a temperaturas bajas la velocidad de reacción es muy lenta y el proceso implica una mayor demanda de tiempo reduciendo la cantidad de material sólido y de alquitranes ya que se favorecen reacciones secundarias (Eduardo García Fernández and Sonia Lucia Rincón Prat 2011). Teniendo en cuenta lo anterior, al sistema de gasificación se realizan diferentes pruebas

cambiando las condiciones de entrada en la temperatura del aire (Tabla 3), y dejando constantes las demás condiciones de frontera.

3.10. Sensibilidad en la velocidad de entrada de aire

La velocidad de ingreso de aire es un factor importante, puesto que velocidades muy altas implican dentro de todas las ecuaciones fenomenológicas un aumento en la continuidad, la cantidad de movimiento, la energía del sistema, y la composición de especies relevantes en el gas de síntesis, un ejemplo de esto es que el incremento en la velocidad tiene mayor incidencia sobre la ecuación de componente (6). Velocidades elevadas implican que los tiempos de residencia en los compuestos sean bajos, lo cual conlleva a velocidades de reacción bajas impidiendo la formación de reacciones secundarias, estas pueden depender de compuestos que no se alcancen a formar. Sin embargo, a bajas velocidades de entrada de aire, pueden ocasionar formaciones de compuestos deseados en lugares diferentes a la combustión. Se realizaron distintas corridas con diferentes velocidades a las pruebas; A, B, C, dejando constantes los demás parámetros con el fin de verificar la incidencia de la velocidad en el sistema de gasificación (Tabla 3).

3.11. Parámetros de las pruebas realizadas en el gasificador

A continuación, se presentan datos para la realización de las diferentes pruebas comparativas en el gasificador.

Tabla 3: Pruebas a diferentes condiciones en el sistema de gasificación

Prueba	A	B	C	B1	C1
Temperatura [k]	800	400	1350	800	800
Velocidad [m/s]	0.12	0.12	0.12	0.01	1
Entrada de biomasa [kg/s]	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

3.12. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera son necesarias para dar comienzo a la simulación, dado que son condiciones iniciales y parámetros que afectan las reacciones necesarias para formar el gas de síntesis deseado en el proceso de gasificación.

Tabla 4: Condiciones de frontera para el sistema de gasificación

Condiciones de frontera	
Presión	1atm
Flujo de entrada de aire	0.14Kg/s
Flujo de entrada de biomasa	0.02Kg/s
Salida de gas de síntesis	0.14Kg/s
$\frac{\partial \text{Volumen}}{\partial t}$	0
Temperatura entrada de biomasa	T^∞

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Efecto sobre parámetros de operación

4.1.1. Cambios en la velocidad a las entradas del sistema

Al modificarse la velocidad en las entradas del sistema produce variaciones en todas las ecuaciones fenomenológicas, ya que, en las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, energía y componente está directamente relacionada (Tabla 5).

Tabla 5: Influencia de la velocidad sobre las ecuaciones fenomenológicas.

Ecuación	Formula
Continuidad	$\rho \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho \frac{\partial v_y}{\partial y} + \rho \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$
Cantidad de Movimiento	$\rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] + \rho g$
	$\rho \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] + \rho g$
	$\rho \left(v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho g$
Energía	$\rho C_p \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - r_r$
Componente	$\rho \left(v_x \frac{\partial \omega_a}{\partial x} + v_y \frac{\partial \omega_a}{\partial y} + v_z \frac{\partial \omega_a}{\partial z} \right) = \rho D_{AB} \left(\frac{\partial^2 \omega_a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_a}{\partial z^2} \right) - r_a$

Por ejemplo, el aumento de la velocidad en la entrada de aire, conservando el área por donde este ingresa, afectaría la cantidad de movimiento debido a un incremento en la turbulencia del fluido, además, de un aumento en el calor convectivo transferido a lo largo del gasificador; intensificando así la temperatura en la zona media del sistema, por el aumento de energía producida por las constantes vibraciones ocasionadas por la turbulencia del fluido.

Por otro lado, las presiones estática y dinámica se pueden afectar de la siguiente manera, un aumento en la velocidad afecta la presión estática y esta disminuye por las paredes del gasificador; sin embargo, la presión dinámica aumenta debido a que ésta es la presión que lleva el fluido sobre la coordenada "Y".

4.1.2. Cambios en la temperatura

Un incremento en la temperatura del aire produce un aumento en el factor pre exponencial que acompaña el factor de frecuencia en la ecuación de Arrhenius; y por ende, el aumento en la constante de velocidad específica de las reacciones principales en el proceso de gasificación. Esto genera que las reacciones exotérmicas proporcionen mayores temperaturas y se generen más componentes; por lo tanto, las reacciones

están en función de la constante de velocidad (K) descrita a continuación, bajo los parámetros cinéticos establecidos (Tabla 5):

$$K = A e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (7)$$

4.2. Modelo 3D

Con el fin de esquematizar un modelo el cual tenga un comportamiento real, se diseña una estructura siguiendo las dimensiones propuestas en la sección 2.2, las cuales facilitan generar un modelo muy parecido al gasificador que se usa en el laboratorio de plantas térmicas y energías renovables de la universidad Nacional (Figura 13). Con la ayuda de diferentes planos generados en la geometría que proporciona ANSYS-FLUENT se logra desarrollar el siguiente modelo.

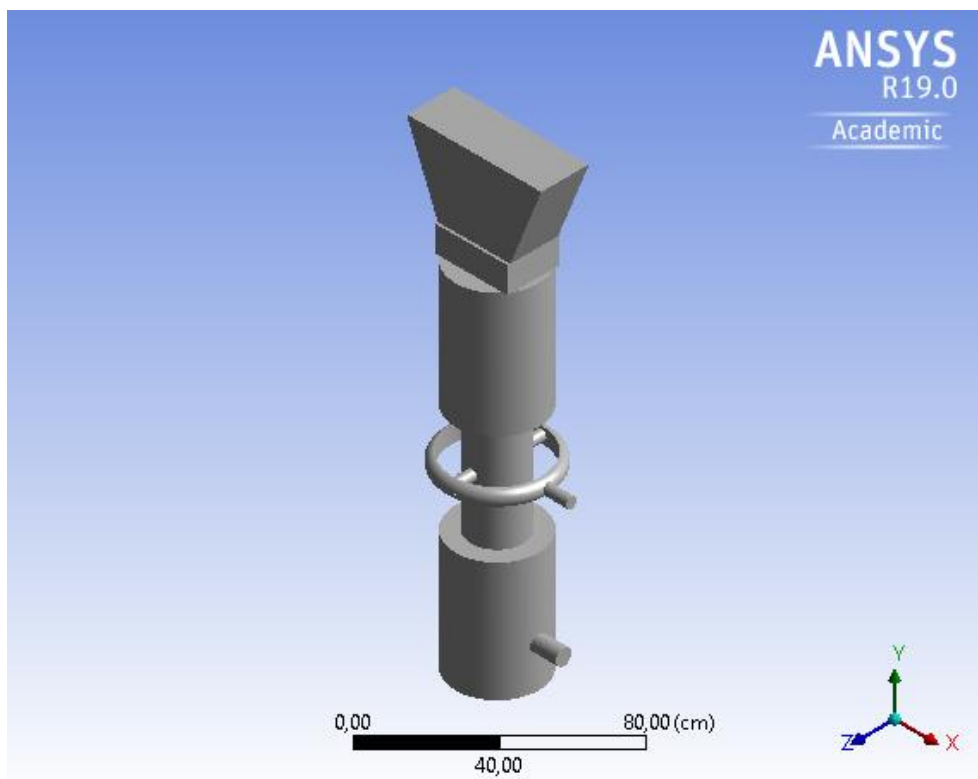


Figura 14 Estructura tridimensional desarrollada en la geometría de ANSYS FLUENT

4.3. Enmallado

Una vez generado el modelo en tres dimensiones (Figura 14), se procede a realizar el enmallado, este se define de manera triangular, con el fin de cubrir de manera uniforme el sistema, y se tienen en cuenta las preferencias físicas se desarrollen bajo CFD necesarias para poder ser desarrolladas en el paquete de FLUENT. Fijando una calidad, se logra una unión entre los diferentes nodos del enmallado, conectando las diferentes superficies del modelo (Figura 15).

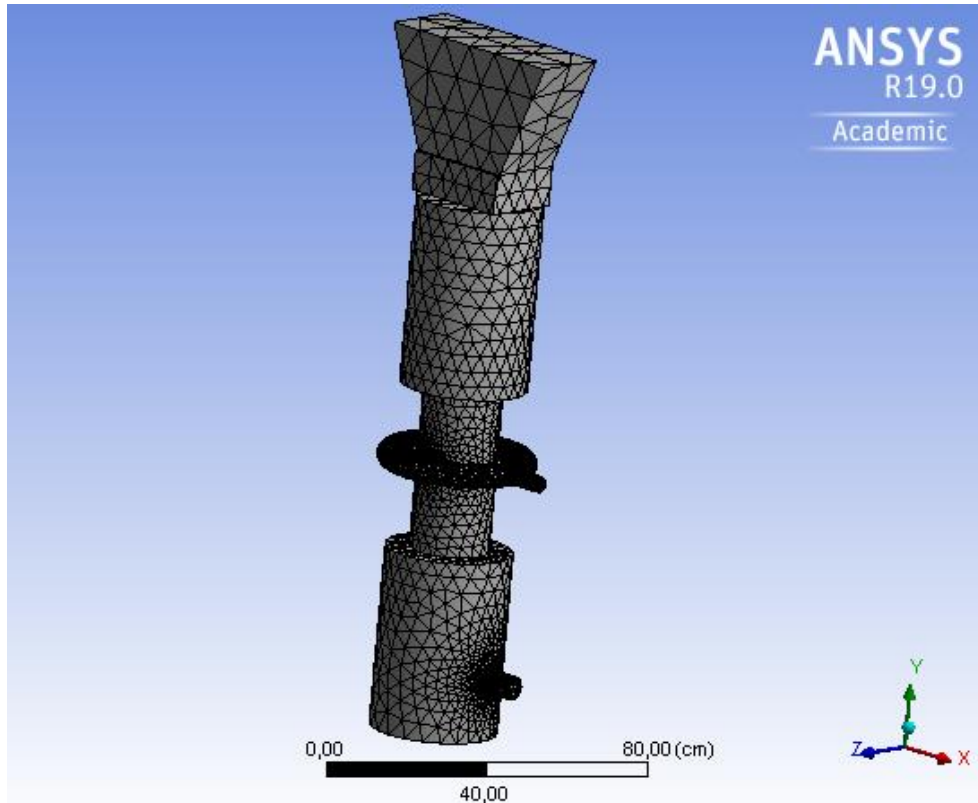


Figura 15 Enmallado en el sistema de gasificación.

El software proporciona 11444 nodos y 5189 elementos posteriores al enmallado, teniendo en cuenta que no se modifica la forma en la cual MESH proporciona el enmallado, se deja de manera estándar: la altura, el área, y los ángulos al formarse en cada porción del modelo.

El software de uso libre para estudiantes ANSYS en la opción MESH, muestra una información más detallada en diferentes tablas adjuntadas como anexos del presente documento, de las cuales, se escoge la tabla que indica el reporte que contiene el tamaño de enmallado del sistema, esta muestra información como tamaño mínimo y máximo de cada celda, ángulos máximos y mínimos de la celda en el enmallado (Tabla 6). Esto con el fin de asegurar que en las superficies más pequeñas se conecte la totalidad del enmallado, rectificando la unión de cada nodo, puesto que, si alguna sección no se encuentra conectada en su totalidad, impide la convergencia en FLUENT.

Tabla 6: Reporte de resultados para el enmallado del sistema

Dimensionamiento	
Función de tamaño	Curvatura
Tamaño máximo	Preestablecido (9,42980 cm)
Programación de la malla	Si
Tamaño programado	Preestablecido (4,7149e-002 cm)
Tasa de crecimiento	Preestablecido (1,20)
Tamaño mínimo	Preestablecido (9,4298e-002 cm)
Tamaño máximo	Preestablecido (18,860 cm)

Angulo normal	Preestablecido (18,0 °)
Delimitador diagonal	188,60 cm
Superficie promedio de área	623,730 cm ²
Longitud de borde mínimo	2,5823e-003 cm
Calidad	
Comprobar la calidad de la malla	SI
Objetivo sesgado	Preestablecido (0.900000)
Suavizado	Alto
Malla métrica	Ninguno

Obtenida la malla deseada, se especifican las entradas y salidas en el modelo de tres dimensiones, mediante la creación de un “nombre” en las caras donde se deseen asignar parámetros de diseño como; caudal, velocidad, presión y temperatura (Figura 16). Además, se fija en el modelo la superficie sólida denotando el cuerpo del gasificador.

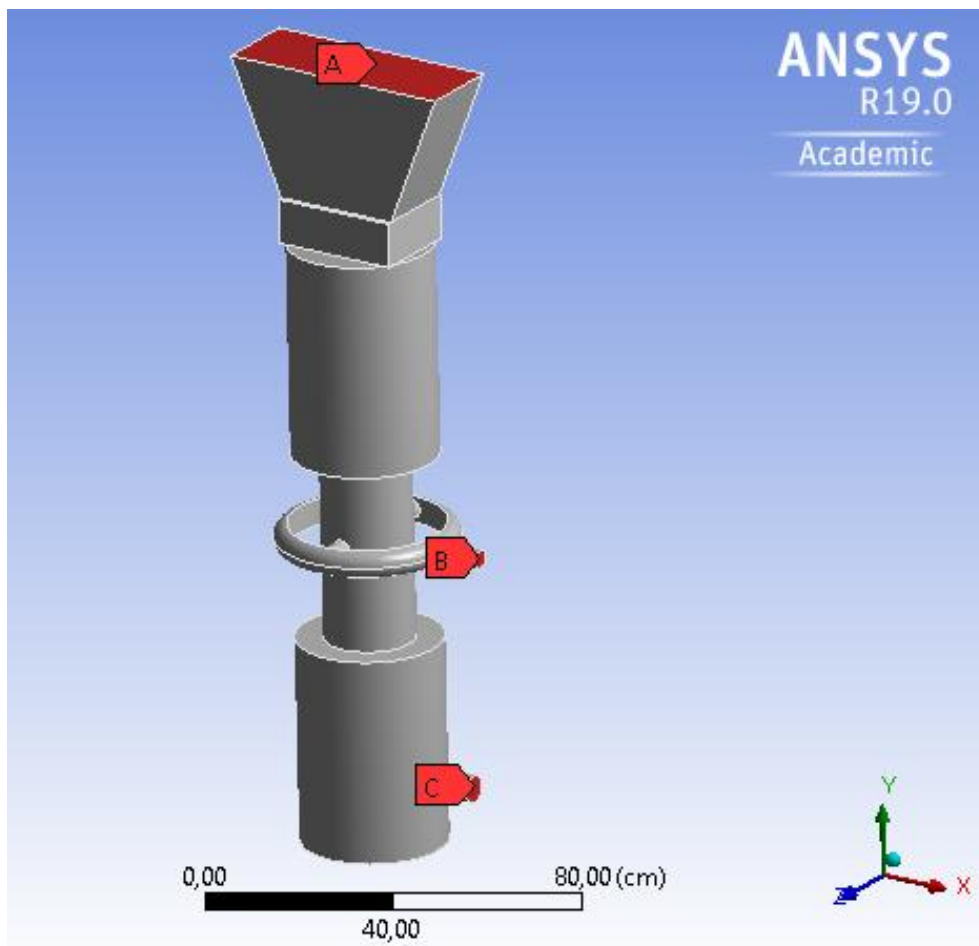


Figura 16 Especificaciones de flujos en el proceso: A) entrada de biomasa. B) entrada de aire, C) salida de gas de síntesis

4.4. Resultados perfiles para la prueba A

En la *Figura 17*, se puede observar los perfiles de temperatura en el interior y sobre la superficie de las paredes externas del gasificador, donde las temperaturas más elevadas se encuentran en la zona donde ingresa el agente oxidante, este proporciona el O_2 necesario para llevar a cabo la combustión, y generar las reacciones exotérmicas necesarias para la producción de gas de síntesis.

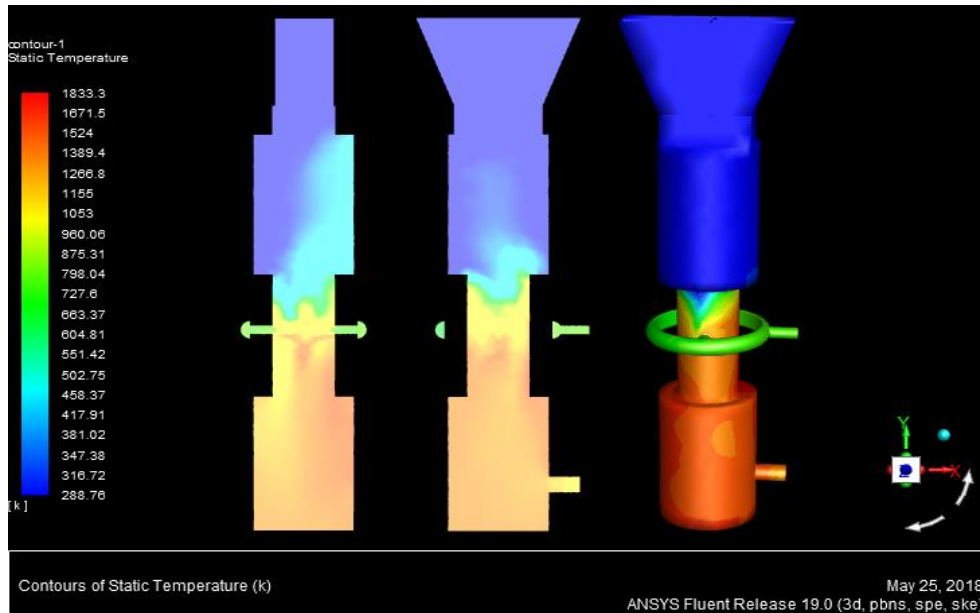


Figura 17 Perfiles de temperaturas sobre diferentes planos; primer plano de izquierda a derecha situado en plano (y,z) , segundo plano situado sobre el eje (y,x) , tercer plano forma 3D del gasificador.

Por otro lado, la ubicación de las menores temperaturas se encuentra en las zonas de secado y pirolisis, gracias a la transferencia de calor convectivo ocasionada desde zonas donde se encuentran las mayores temperaturas (zona de combustión y zonas de oxido-reducción) hacia la parte superior del gasificador. Los perfiles de temperatura obtenidos posterior a la simulación tienen un comportamiento similar a los perfiles de acuerdo con Ramirez (Ramírez Rubio 2010), gracias a las reacciones endotérmicas las cuales se consumen en la pirolisis para formar compuestos necesarios para las reacciones exotérmicas en la combustión generando las temperaturas más elevadas.

4.5. Perfil de velocidad

La velocidad permanece constante a lo largo del gasificador, puesto que, no se modifican condiciones en la entrada de biomasa, únicamente se modifican condiciones a la entrada de aire.

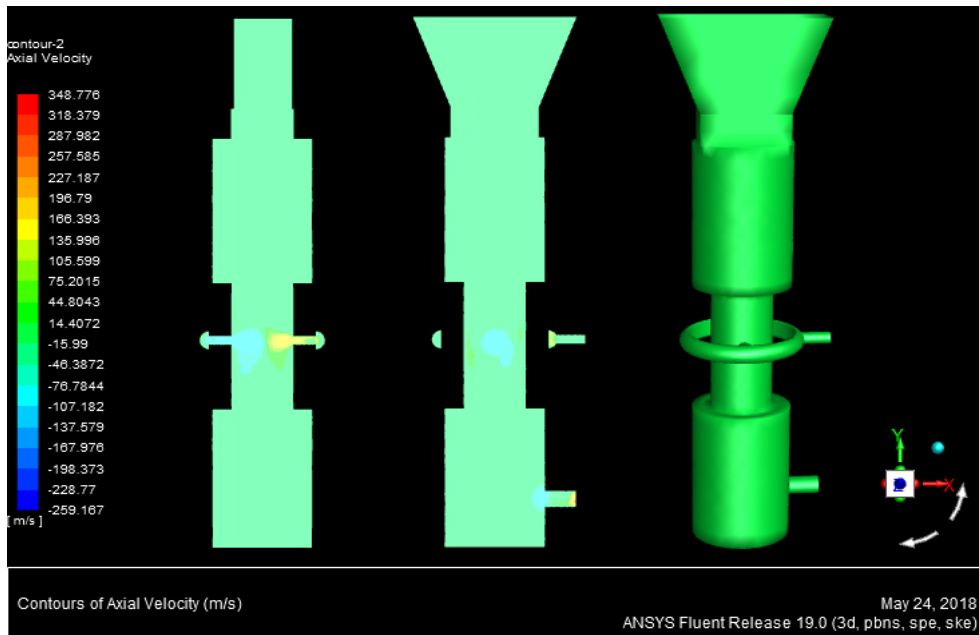


Figura 18 Perfiles de velocidad axial m/s sobre diferentes planos; primer plano de izquierda a derecha situado en plano (y,z), segundo plano situado sobre el eje (y,x), tercer plano forma 3D del gasificador

4.6. Perfil de concentraciones

4.6.1. Concentración de biomasa

La concentración del material volátil va disminuyendo a lo largo del gasificador. En el primer sector conformado la zona de secado y pirolisis, en las cuales las reacciones endotérmicas dan un inicio a la disminución de tamaño puesto que estas no consumen la mayor parte de la biomasa, esta continua hasta ser casi reducida por la combustión. Por otra parte, en el segundo sector conformado por las zonas de combustión y oxido reducción, el ingreso del agente oxidante, favorece el consumo del material volátil, puesto que allí se generan gases como; CO_2 , CO , H_2 , principales componentes del gas de síntesis.

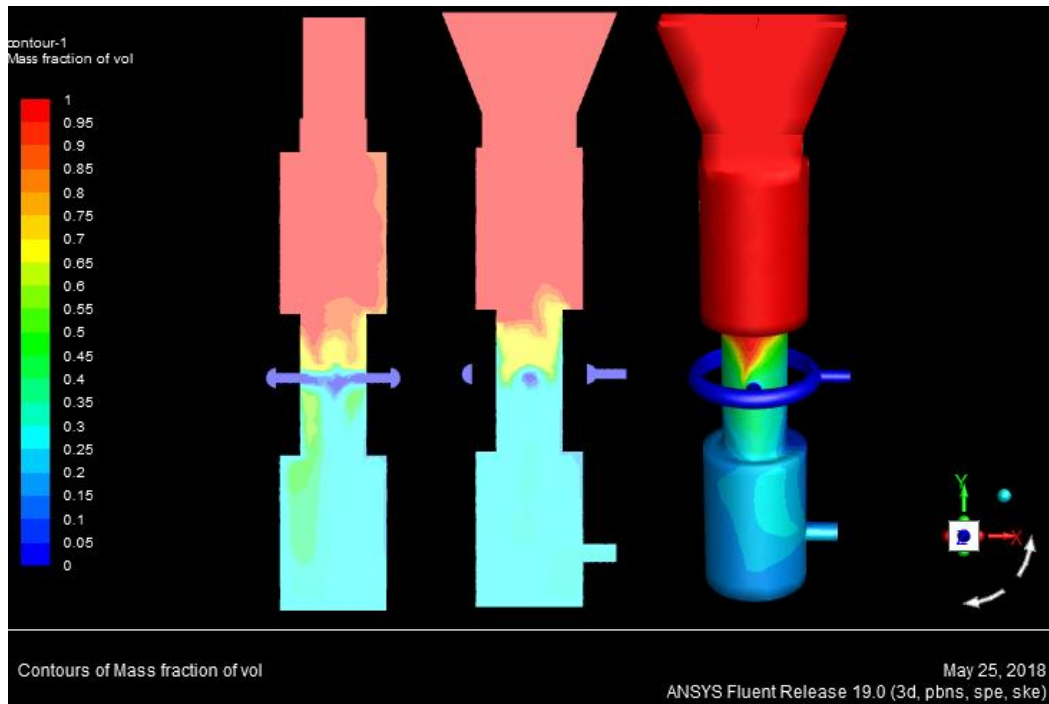


Figura 19 Perfiles de consumo de material volátil: primer plano de izquierda a derecha situado en el eje (y, z), segundo plano situado sobre el eje (y,x), tercer plano forma 3D del gasificador

4.6.2. Concentración de dióxido de carbono

El dióxido de carbono producido al interior del sistema pronosticado por FLUENT, muestra que la mayor cantidad se genera en el centro del gasificador, donde se encuentran las entradas de aire, la cual facilita la combustión y el consumo de las reacciones homogéneas y heterogéneas que tiene como producto la formación de CO_2 . Posterior a la simulación se obtienen fracción másica de 0.05101, el cual, comparando con datos de literatura esta algo lejos puesto que se pueden encontrar valores de CO_2 entre 0.11-0.15 de acuerdo con García (Eduardo García Fernández and Sonia Lucia Rincón Prat 2011).

Por otro lado, cabe mencionar que se esperaba una cantidad reducida de este gas, puesto que, este pasa de ser generado a ser consumido para generar CO (reacción 7 o reacción de *Boudouard*), y así tener en mayor proporción monóxido de carbono en el gas de síntesis aumentando su calidad (Ramírez Rubio 2010) .

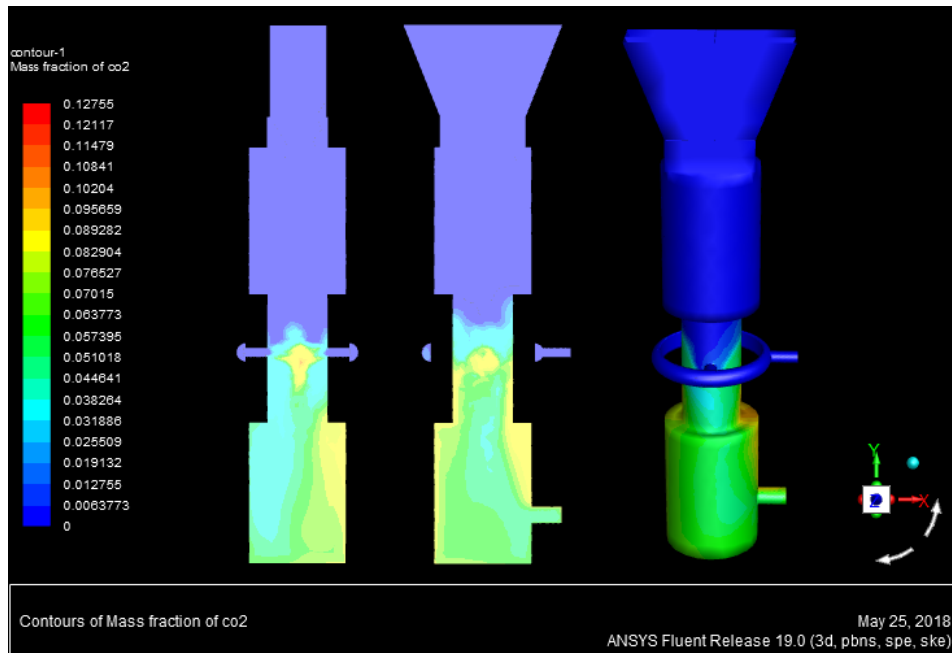


Figura 20 Perfiles de generación de CO₂: primer plano de izquierda a derecha situado en el eje (y, z), segundo plano situado sobre el eje (y,x), tercer plano forma 3D del gasificador

4.6.3. Concentración de monóxido de carbono

La producción de monóxido de carbono se genera desde el segundo sector del gasificador, donde las producciones más altas se logran por la oxidación de carbono y el metano produciendo la mayor cantidad de monóxido de carbono en la salida del gasificador, con una fracción másica de 0.16, que en comparación a datos experimentales se obtienen valores en fracción másica entre los 0.19 a 0.24 (Eduardo García Fernández and Sonia Lucia Rincón Prat 2011). Así mismo, al comparar los perfiles de monóxido de carbono, con el último caso de estudio en la sección 1.4, en el cual se utiliza ANSYS en una versión anterior, hay comportamiento similar al interior del reactor, la única diferencia radica en la salida del monóxido de carbono, este no tiende a disminuir su concentración a la salida del reactor (Figura 10), por lo contrario permanece constante, esta diferencia radica en la composición de la biomasa utilizada en la simulación del gasificador (Tabla 1), ocasionando variación en los perfiles simulados, pero con comportamientos similares.

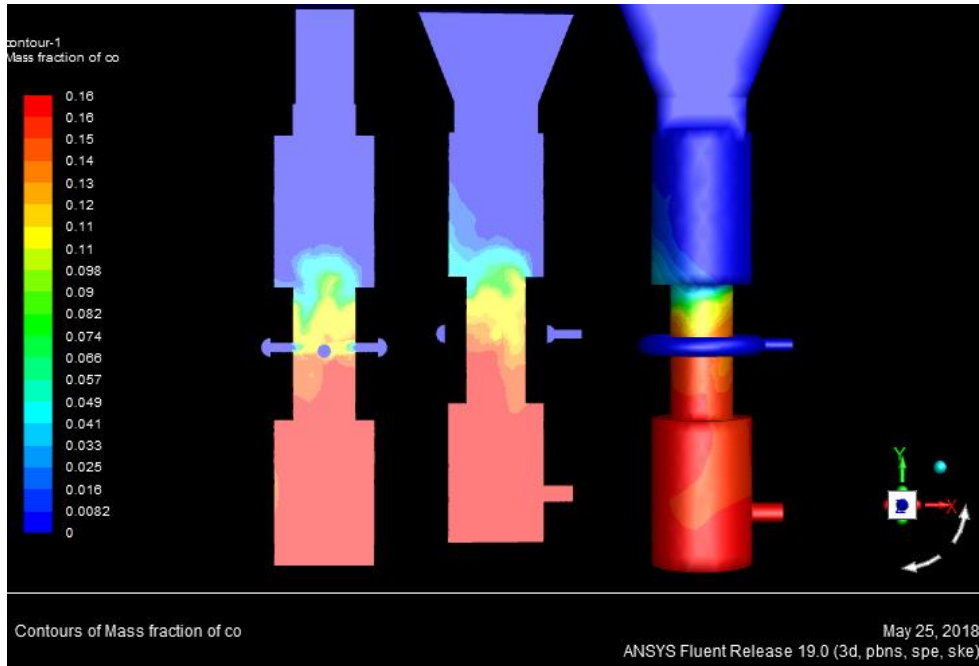


Figura 21 Perfiles de generación de CO: primer plano de izquierda a derecha situado en el eje (y, z), segundo plano situado sobre el eje (y,x), tercer plano forma 3D del gasificador

4.6.4. Concentración de H₂

Para la concentración de H₂ posterior a la convergencia, se encuentran valores de 0.00028 en fracción másica, para la salida del gas de síntesis, en comparación a datos experimentales que rondan en fracción másica valores de 0.10-0.15 (Eduardo García Fernández and Sonia Lucia Rincón Prat 2011), este valor bajo de H₂ pudo producirse al momento de adicionar las reacciones, puesto que, pudieron cometerse errores debido a los valores en los parametros cinéticos de la reacción ingresados en la simulación.

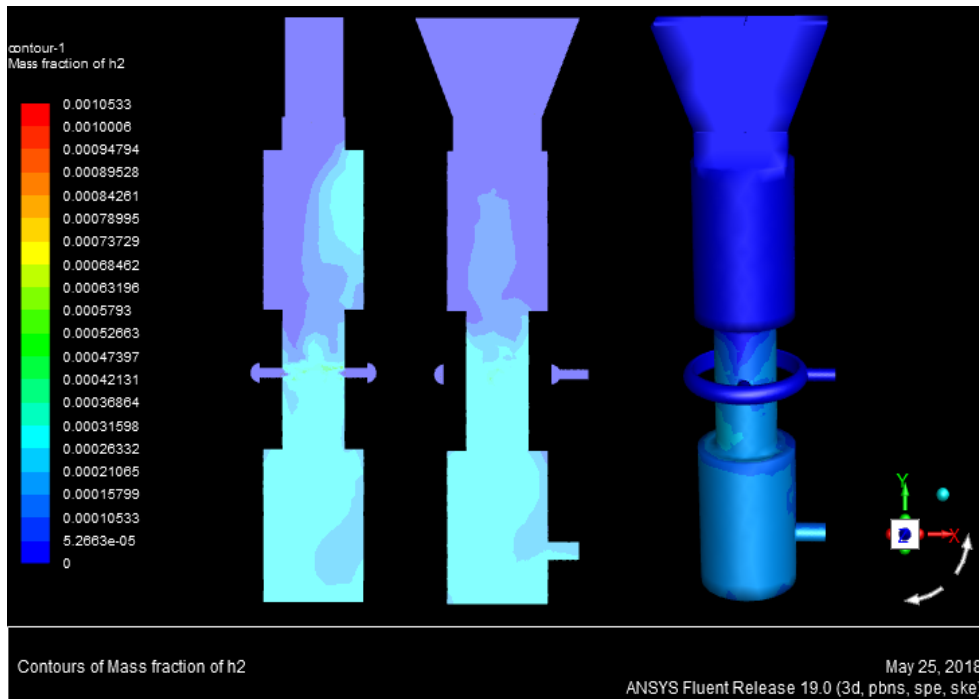


Figura 22 Perfiles de generación de CO: primer plano de izquierda a derecha situado en el eje (y, z), segundo plano situado sobre el eje (y,x), tercer plano forma 3D del gasificador

4.7. Resultados modificando la temperatura en las diferentes pruebas realizadas en el sistema de gasificación

El ingreso de aire con diferentes temperaturas muestra que; a una temperatura de 800K, las reacciones endotérmicas que se comienzan a formar entre la zona de pirolisis y la zona de combustión ayudan a generar compuestos necesarios para que las reacciones exotérmicas liberen la energía necesaria para mantener el proceso, así mismo, liberan gases importantes en el gas de síntesis como los son; CO, CO₂, H₂ (Figura 25, 26, 27). Por otro lado, a una temperatura de entrada de 400K, las velocidades de reacción son lentas generando un aumento en las reacciones endotérmicas incentivando la reactividad del CO₂ y el carbón presente, dando lugar a un aumento de CO, el se consume parcialmente en las reacciones 2 y 3 (Tabla 2) para nuevamente producir algo de CO₂, logrando un incremento leve de temperatura en la zona de pirolisis. Además, disminuye la producción de H₂, puesto que, las reacciones exotérmicas no tienen tanta energía, esta consumida por las reacciones endotérmicas durante las pirolisis. Finalmente, con una temperatura de 1350K en la entrada principal de aire, el calor por convección se transfiere por las paredes adyacentes al sistema total de ingreso de aire, generando un descenso en la temperatura a 498K en las dos entradas secundarias unidas al sistema de gasificación. Además, por la temperatura tan elevada en la entrada principal del aire origina una disminución de la densidad a lo largo del sistema de gasificación, que permanece constante desde las entradas secundarias ubicadas en la zona de combustión hasta la zona de secado. Así mismo, la biomasa es consumida desde la zona de secado por un incremento en las condiciones de reactividad, produciendo en consecuencia CO, CO₂, H₂.

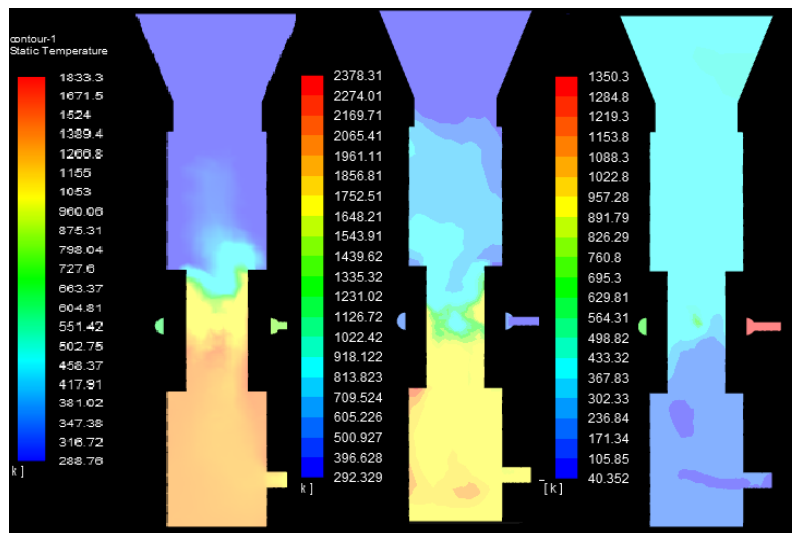


Figura 23 Perfiles de temperatura para las pruebas; A) 800k, B) 400k, C) 1350K.

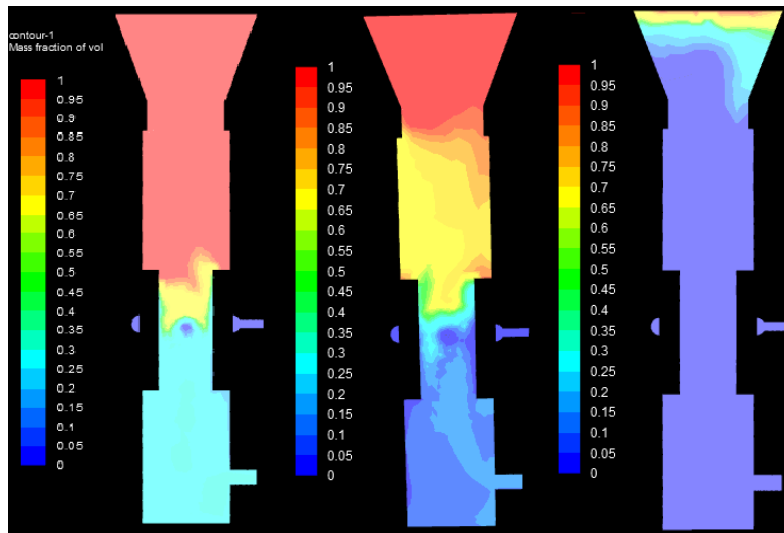


Figura 24: Perfiles para la concentración de material volátil en pruebas; A) 800k, B) 400k, C) 1350K.

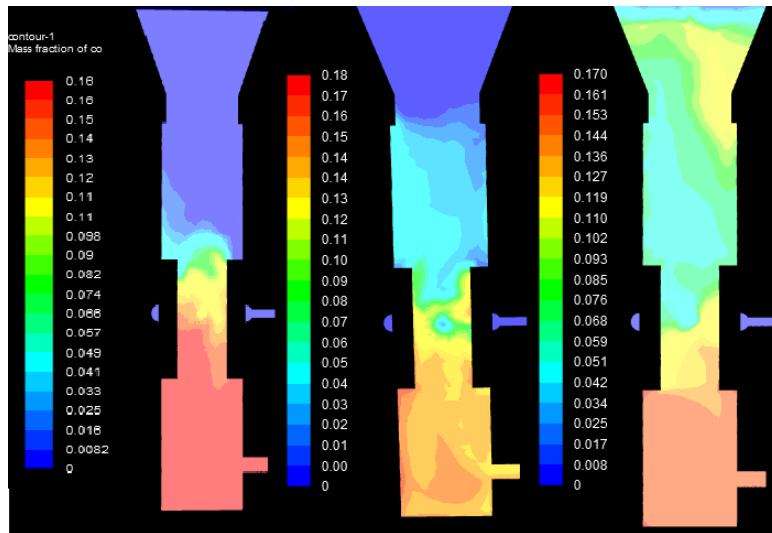


Figura 25 Perfiles para la concentración de CO en pruebas; A) 800k, B) 400k, C) 1350K.

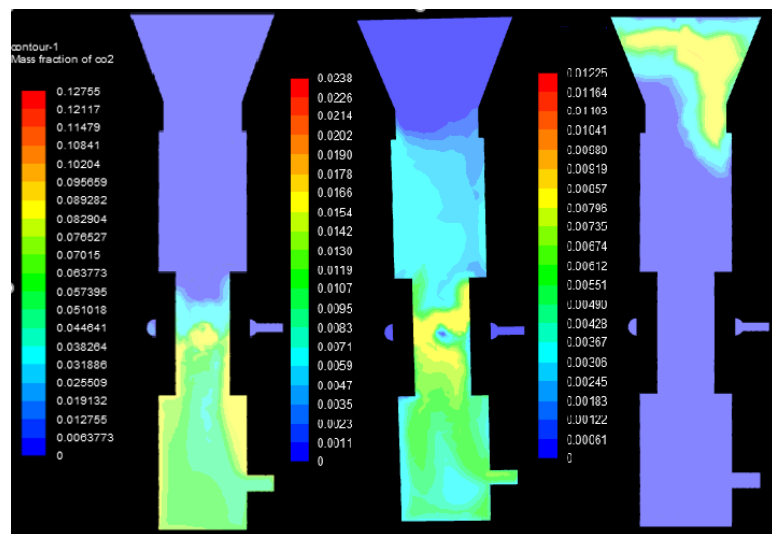


Figura 26 Perfiles para la concentración de CO₂ en pruebas; A) 800k, B) 400k, C) 1350K.

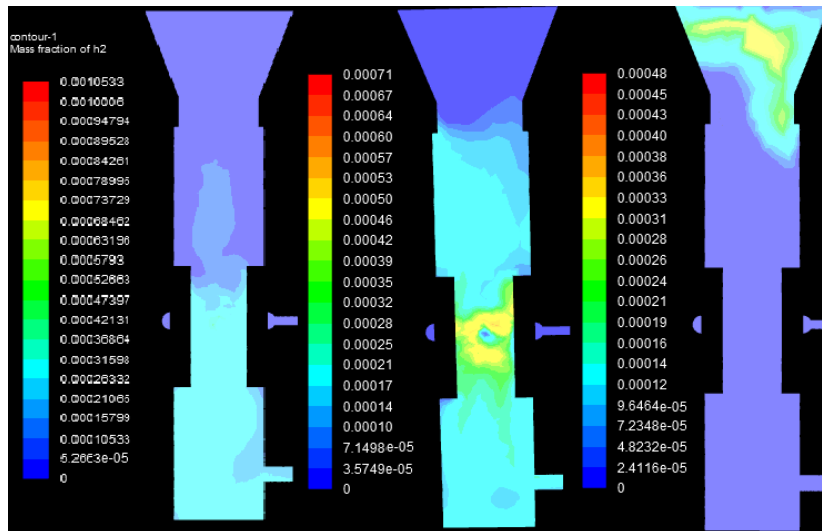


Figura 27 Perfiles para la concentración de H₂ en pruebas; A) 800k, B) 400k, C) 1350K.

4.8. Resultados modificando la velocidad en las distintas pruebas realizadas en el sistema de gasificación

La velocidad de ingreso de aire, al igual que la temperatura son factores importantes para generar un gas de síntesis con una buena composición de CO, CO₂, H₂, ya que; a velocidades muy lentas en la entrada de aire, no presenta cambios relevantes en la temperatura del sistema (Figura 28; prueba B1), puesto que, las reacciones endotérmicas no generan los compuestos necesarios para llevar a cabo las reacciones exotérmicas generadas entre las zona de pirólisis y combustión, no liberan tanta energía, acumulando la mayores temperatura hacia el fondo el sistema. Así mismo, las velocidades lentas ocasionan un escaso consumo del material volátil, puesto que, este cae al fondo del gasificador sin ser consumido en la zona de combustión causando bajas concentraciones de CO, CO₂, H₂. Por otro lado, un aumento de velocidad, tiene efecto sobre la ubicación en las temperaturas mas elevada ya que se encentran en las zonas no deseadas, empezando desde la zona de secado y pirólisis (Figura 28; prueba C1), donde se inicia el consumo de todo el material volátil, desde allí, se generan los gases como; CO, CO₂, H₂, los cuales tienden a quedarse en esta zona y no desplazarse hacia la salida del sistema de gasificación (Figuras 29, 30, 31, 32; prueba C1).

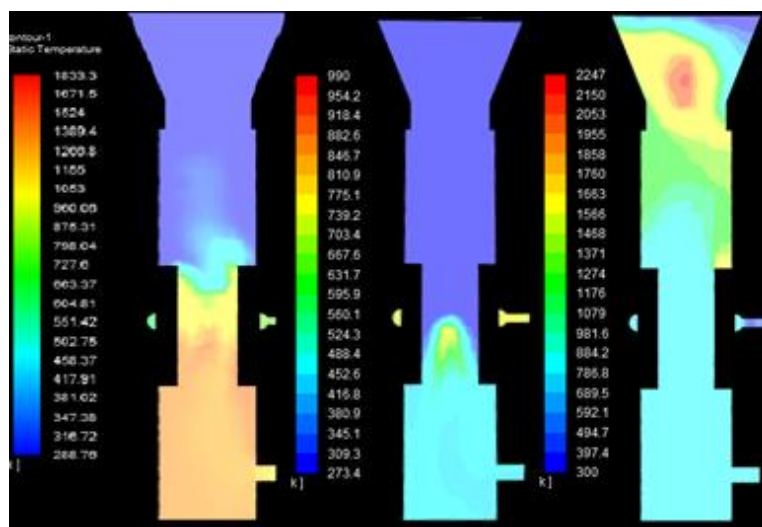


Figura 28 Perfiles de temperaturas para las pruebas; A) 0.12m/s, B1) 0.01m/s, C1) 1m/s.

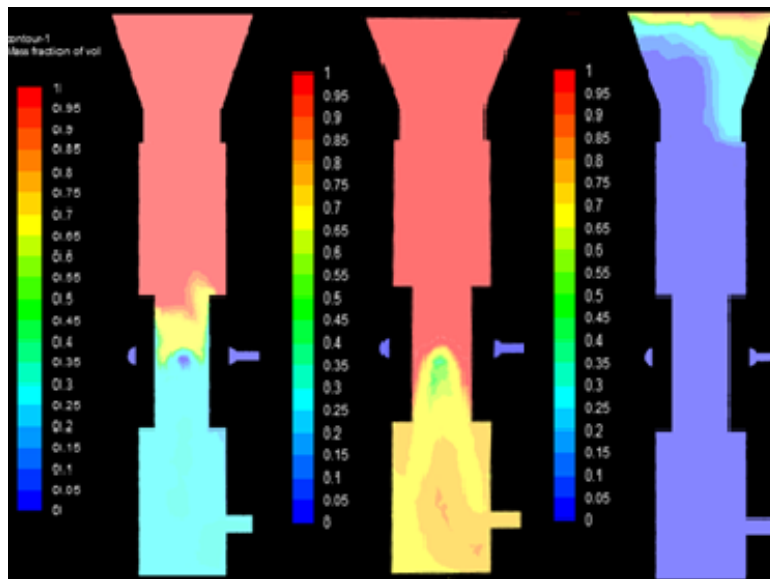


Figura 29 Perfiles para el consumo de material volátil en pruebas; A) 0.12m/s, B1) 0.01m/s, C1) 1m/s.

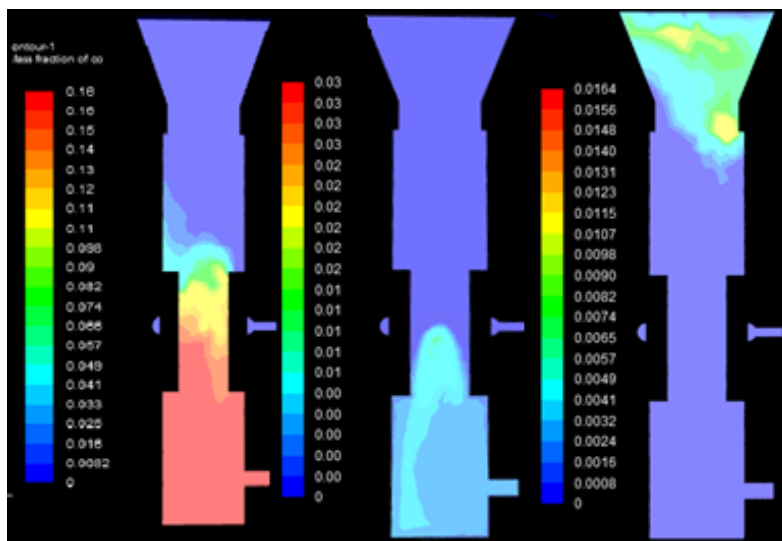


Figura 30 Perfiles de concentración de CO para las pruebas; A) 0.12m/s, B1) 0.01m/s, C1) 1m/s.

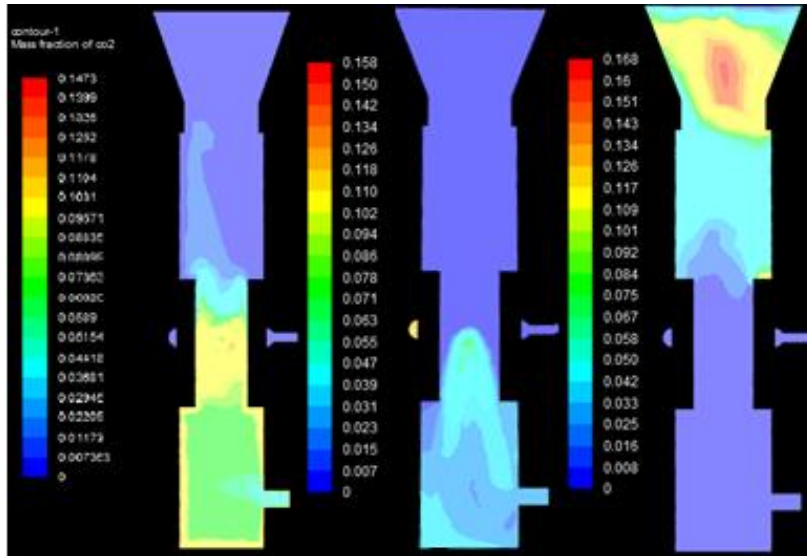


Figura 31 Perfiles de concentración de CO₂ en las pruebas; A) 0.12m/s, B1) 0.01m/s, C1) 1m/s.

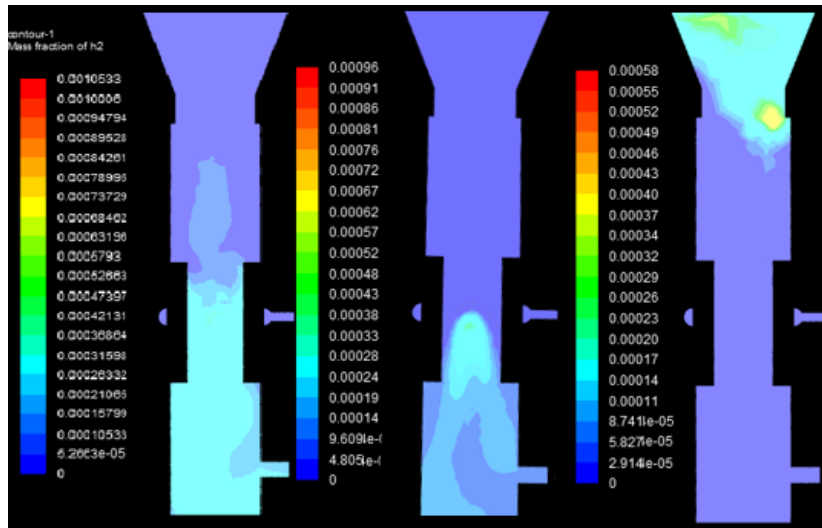


Figura 32 Perfiles de concentración de H₂ en las pruebas; A) 0.12m/s, B1) 0.01m/s, C1) 1m/s.

5. CONCLUSIONES

- Se analizó mediante la herramienta de dinámica de fluidos computacional el comportamiento fenomenológico del gasificador de lecho fijo el cual se utiliza en el laboratorio de plantas térmicas y energías renovables de la universidad Nacional y se determina la incidencia de variables como temperatura afectando las ecuaciones de energía y componente. Además, con una variación de la velocidad la cual repercute en todas las ecuaciones (continuidad, energía, momentum, componente), en el sistema de gasificación. Teniendo en cuenta lo anterior se infiere que; para la obtención de un gas de síntesis con composiciones de CO, CO₂, H₂ la temperatura más adecuada es de 850K a una velocidad de 0.12m/s, manteniendo una entrada de biomasa constante (prueba A).
- Una vez establecido el modelo para la simulación de un gasificador de lecho fijo corriente descendente mediante la herramienta ANSYS-FLUENT, se evalúan los perfiles de temperatura, consumo de material volátil, y concentraciones de CO, CO₂, H₂, para diferentes pruebas (A, B,C, B1, C1), es posible notar el desplazamiento de los gases que se desean como productos en el gas de síntesis, dependiendo de la variación

de condiciones de frontera, a causa de incrementos de temperatura disminuyendo la densidad de los gases y acumulándolos en zonas no deseadas como la de secado.

- Se evalúa el comportamiento de perfiles de velocidad, presión, temperatura y componente para un gasificador de leche fijo corriente descendente (Prueba A), de los cuales se concluye que la temperatura tiene un incremento conforme se consume el material volátil, esto gracias a las reacciones exotérmicas en la zona de combustión donde se registran la temperatura más alta, que se desplazan por la zona de combustión y oxido reducción. Además, la velocidad permanece constante a lo largo del gasificador, puesto que esta permanece constante. Finalmente, los mayores productos característicos del gas de síntesis se inician en la zona de combustión, estas se trasladan hacia la salida con una mayor temperatura gracias a la energía aportada por el calor de convección.

6. RECOMENDACIONES

Para realizar modelos más complejos, los cuales involucren diferentes alternativas como; cambio de fase, un modelamiento dinámico que varíe con el tiempo, o un numero de iteraciones mayores para conseguir mejores resultados, se debe tener en cuenta la limitación de “nodos” que el software para estudiantes ANSYS versión 19.0 trae preestablecidas, puesto que a exigencias mayores del software tiende a generar errores o un tiempo prologado para resolver las iteraciones deseadas,

Tener en cuenta que el procesador puede llegar a ser vital, puesto que, al correr diferentes simulaciones ya sea en ANSYS-FLUENT, ANSYS CFX, ANSYS-HYDRODYNAMICS, se debe hacer una simulación por cada paquete contenido dentro del WORKBENCH, el cual contiene cada una de las diferentes opciones previamente mencionada. Ya que, si se desea desplegar mas de una de las opciones a la vez, puede que no abran correctamente o genere errores durante la ejecución de los mismos.

Para el desarrollo de una simulación que involucre reacciones como un gasificador, se debe iniciar con el transporte de especies proporcionadas como opción en el mecanismo de especies de FLUENT, ya que, si se desea iniciar, con la opción multifase, se debe tener más conocimiento de las reacciones a utilizar, dado que, esta genera un PDF con un balance riguroso de las reacciones, ayudado del paquete de CHEMIK.

Con el fin de tener mejores resultados, se pueden cargar materiales para la superficie sólida del modelo que se este simulando, para lograr un aislamiento térmico vital para zonas como; la zona de combustión, o la implementación de inyecciones de forma dispersa del material volátil en la opción de FLUENT, con el fin de generar una mayor disipación de la combustión y tener mayor composición de CO, CO₂ y H₂ en el gas de síntesis.

7. AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres por todo el apoyo y la fuerza que me brindaron durante el desarrollo de este trabajo, a mi abuela, que, aunque ya no esté presente siempre mirare al horizonte y podre ver un cielo que nos une.

Quisiera agradecer de la manera más atenta a mi director, el Dr-Ing Carlos Andrés Forero Núñez, por confiarme este trabajo, por la paciencia y tiempo dedicado ya que fueron aspectos claves para el progreso y éxito de esta tesis presentada.

A mis amigos, gracias por todos los buenos recuerdos. Les deseo que cumplan todas sus metas y propósitos

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bridgwater, A. V. 1995. "The Technical and Economic Feasibility of Biomass Gasification for Power Generation." *Fuel* 74(5):631–53. Retrieved (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623619500001L>).
- Brown, Robert C.(Robert Clinton). 2011. *Thermochemical Processing of Biomass Conversion into Fuels, Chemicals and Power*. Wiley.
- Eduardo García Fernández, Luis and Dr-Ing Sonia Lucia Rincón Prat. 2011. "Obtención de Gas Combustible a Partir de La Gasificación de Biomasa En Un Reactor de Lecho Fijo." Retrieved May 29, 2018 (<http://www.bdigital.unal.edu.co/4133/1/291461.2011.pdf>).
- FI, David Francisco. 2016. "Obtención de Gas de Síntesis a Partir de La Gasificación de Cuesco de Palma de Aceite Peletizado."
- Forero Núñez, Carlos A., José U. Castellanos Contreras, and Fabio E. Sierra Vargas. 2013. "Control De Una Planta Prototipo De Gasificación De Biomasa Mediante Redes Neuronales." *Ingeniería Mecánica Tecnología Y Desarrollo* 4(5):161–68.
- Gómez-Barea, A. and B. Leckner. 2010. "Modeling of Biomass Gasification in Fluidized Bed." *Progress in Energy and Combustion Science* 36(4):444–509.
- Ismail, Tamer M., M. Abd El-Salam, Eliseu Monteiro, and Abel Rouboa. 2016. "Eulerian - Eulerian CFD Model on Fluidized Bed Gasifier Using Coffee Husks as Fuel." *Applied Thermal Engineering* 106:1391–1402. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.102>).
- Ismail, Tamer M., M. Abd El-Salam, Eliseu Monteiro, and Abel Rouboa. 2018. "Fluid Dynamics Model on Fluidized Bed Gasifier Using Agro-Industrial Biomass as Fuel." *Waste Management* 73:476–86. Retrieved (<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.018>).
- Juan Pérez^{1*}, David Borge² and John Agudelo¹. n.d. "Proceso de Gasificación de Biomasa: Una Revisión de Estudios Teórico – Experimentales." Retrieved November 11, 2017 (<http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n52/n52a09.pdf>).
- Kohnke, Peter. 1999. "ANSYS Theory Reference - Release 5.6." 1286. Retrieved (<http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansys56manual.pdf>).
- Liu, Hui, Robert J. Cattolica, and Reinhard Seiser. 2017. "Operating Parameter Effects on the Solids Circulation Rate in the CFD Simulation of a Dual Fluidized-Bed Gasification System." *Chemical Engineering Science* 169:235–45. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2016.11.040>).
- Monteiro, Eliseu et al. 2017. "Assessment of the Miscanthus Gasification in a Semi-Industrial Gasifier Using a CFD Model." *Applied Thermal Engineering* 123:448–57. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.128>).
- Nguyen, Thanh D. B., Myung Won Seo, Young-Il Lim, Byung-Ho Song, and Sang-Don Kim. 2012. "CFD Simulation with Experiments in a Dual Circulating Fluidized Bed Gasifier." *Computers & Chemical Engineering* 36:48–56. Retrieved (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098135411002080>).
- Ramírez Rubio, Santiago. 2010. "Simulación Computacional Del Proceso De Gasificación De Biomasa En El Reactor De Lecho Fijo De La Facultad De Ingeniería De La Universidad Nacional De Colombia." 127.
- Remedy, B. M. C. and Asset Management. 2009. "User ' S Guide." *Computer* (January). Siglo, Para E. L. 2016. "Energías Renovables 2016 Reporte de La Situación Mundial."
- Sudiro, Maria, Manuel Pellizzaro, Fabrizio Bezzo, and Alberto Bertucco. 2010. "Simulated Moving Bed Technology Applied to Coal Gasification." *Chemical Engineering Research and Design* 88(4):465–75. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2009.09.001>).
- Tu, Jiyuan et al. 2013. "Computational Fluid Dynamics." Pp. 1–29 in *Computational Fluid Dynamics*. Elsevier. Retrieved November 11, 2017 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080982434000019>).

A. ANEXOS

Resultados de convergencia proporcionados por ANSYS FLUENT

Welcome to ANSYS Fluent Release 19.0

Copyright 1987-2017 ANSYS, Inc. All Rights Reserved.
Unauthorized use, distribution or duplication is prohibited.
This product is subject to U.S. laws governing export and re-export.
For full Legal Notice, see documentation.

Build Time: Dec 18 2017 15:16:54 Build Id: 10138

This is an academic version of ANSYS FLUENT. Usage of this product
license is limited to the terms and conditions specified in your ANSYS
license form, additional terms section.

Host spawning Node 0 on machine "DESKTOP-VKOE2FM" (win64).
WARNING: No cached password or password provided.
use '-pass' or '-cache' to provide password
Host 0 -- ip 192.168.1.50 -- ranks 0

host | 0
=====|=====
0 : SHM

Prot - All Intra-node communication is: SHM

ID Hostname Core O.S. PID Vendor

n0 DESKTOP-VKOE2FM 1/4 Windows-x64 6360 Intel(R) Core(TM) i5-6200U
host DESKTOP-VKOE2FM Windows-x64 15128 Intel(R) Core(TM) i5-6200U

MPI Option Selected: ibmmpi

Cleanup script file is C:\Users\Win\cleanup-fluent-DESKTOP-VKOE2FM-15128.bat

Posting ANSYS Product Improvement Program startup data
Done.

> Multicore SMT processors detected. Processor affinity set!

```
Reading "\\| gunzip -c \"C:\Users\Win\gasificador_files\dp0\FLU-8\Fluent\SYS-Setup-
Output.cas.gz\"\\\"...
Buffering for file scan...
```

```
51894 tetrahedral cells, zone 3, binary.
23 triangular wall faces, zone 1, binary.
98643 triangular interior faces, zone 2, binary.
22 triangular mass-flow-inlet faces, zone 6, binary.
60 triangular mass-flow-inlet faces, zone 7, binary.
60 triangular mass-flow-inlet faces, zone 8, binary.
10125 triangular wall faces, zone 9, binary.
11444 nodes, binary.
11444 node flags, binary.
```

Building...

```
mesh
materials,
interface,
domains,
mixture
zones,
wall-solid
inlet_air_
inlt_biomass
outlet_syngas
surface
interior-solid
solidSetting solid (mixture) ... Done.
Setting zone id of solid to 3.
Setting zone id of interior-solid to 2.
Setting zone id of surface to 9.
Setting zone id of outlet_syngas to 8.
Setting zone id of inlt_biomass to 6.
Setting zone id of inlet_air_ to 7.
Setting zone id of wall-solid to 1.
Done.
Setting solid (mixture) ... Done.
Setting inlet_air_ (mixture) ... Done.
Setting interior-solid (mixture) ... Done.
Setting surface (mixture) ... Done.
Setting outlet_syngas (mixture) ... Done.
Setting inlt_biomass (mixture) ... Done.
Setting wall-solid (mixture) ... Done.
```

```
warning: for compressible (ideal and real) gas models with buoyancy,
it is recommended to use a specified operating density value of zero.
GUI access: Cell Zone/Boundary Conditions -> Operating Conditions...
TUI access: define operating-conditions operating-density?
```


parallel,Warning: mass imbalance in reaction-1 stoichiometry.
Warning: mass imbalance in reaction-1 stoichiometry.

Done.

Preparing mesh for display...
Done.

Setting Post Processing and Surfaces information ... Done.

Initialize using the hybrid initialization method.

Checking case topology...
-This case has both inlets & outlets
-Pressure information is not available at the boundaries.
Case will be initialized with constant pressure

iter scalar-0

1 1.000000e+00
2 3.892620e-04
3 7.193880e-05
4 2.248711e-05
5 6.418858e-06
6 2.210224e-06
7 7.551824e-07
8 2.770740e-07
9 1.199174e-07
10 5.745765e-08

Hybrid initialization is done.

Initializing mass fractions of
vol o2 co2 h2o so2 n2 co c h2 ch4
to 0.01 for Eddy-Dissipation ignition.

Writing Settings file "C:\Users\Win\gasificador_files\dp0\FLU-8\Fluent\SYS.set"...
writing rp variables ... Done.
writing domain variables ... Done.
writing solid (type fluid) (mixture) ... Done.
writing interior-solid (type interior) (mixture) ... Done.
writing surface (type wall) (mixture) ... Done.
writing outlet_syngas (type mass-flow-outlet) (mixture) ... Done.
writing inlt_biomass (type mass-flow-inlet) (mixture) ... Done.
writing inlet_air_ (type mass-flow-inlet) (mixture) ... Done.
writing wall-solid (type wall) (mixture) ... Done.
writing zones map name-id ... Done.

iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon vol o2 co2 h2o so2 n2
co c h2 ch4 time/iter

1 1.0000e+00 1.7924e-02 1.6564e-02 1.9615e-02 2.9572e+02 7.4158e-01 7.0982e-01
9.9305e-01 9.9149e-01 1.1755e-02 9.9083e-01 1.6473e-03 1.1036e-01 1.6963e-02
9.8547e-01 3.7046e-03 1.1274e-02 0:03:45 99

2 1.0000e+00 3.1723e-02 2.1702e-02 2.4678e-02 1.2893e-02 4.1331e-01 7.5732e-01
4.7360e+00 1.8568e-01 9.7509e-03 2.5698e-01 1.7445e+01 1.0992e-03 1.3670e-02
3.8514e-01 3.1108e-02 1.2323e-02 0:03:37 98

3 9.5066e-01 3.2357e-02 1.8592e-02 2.1818e-02 2.7950e-02 1.6996e-01 1.4054e-01
2.9847e-01 1.1327e-01 1.7141e-02 4.9152e-01 1.6921e-02 1.9138e-03 3.8015e-02
8.2369e-01 1.1025e-01 7.2846e-02 0:03:50 97

4 9.7074e-01 3.3561e-02 2.0504e-02 2.5428e-02 3.2970e-03 1.1065e-01 1.5039e-01
1.4707e-01 5.4146e-02 1.7200e-02 1.1234e-01 1.6904e-01 2.1324e-03 3.4923e-02
4.4578e-01 1.3375e-01 2.4704e-01 0:04:00 96

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 2
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

5 9.6854e-01 3.7466e-02 2.9219e-02 3.5573e-02 8.2065e-03 1.4233e-01 8.1764e-01
8.5922e-02 3.3766e-02 4.1055e-02 8.2930e-02 1.1970e-01 2.1115e-03 3.0143e-01
5.0836e-01 1.1263e-01 1.5638e-01 0:03:48 95

6 1.0046e+00 7.4377e-02 5.8466e-02 6.6447e-02 3.9385e-03 1.0419e-01 2.1353e-01
5.1133e-02 2.8072e-02 4.4046e-02 5.2362e-02 1.1320e-01 5.5916e-03 2.0395e-01
4.7223e-01 6.0875e-02 3.8761e-02 0:03:57 94

7 7.6316e-01 4.3054e-02 3.2445e-02 3.8517e-02 3.4771e-03 7.4908e-02 1.0999e-01
3.6578e-02 1.8682e-02 4.5165e-02 3.6965e-02 2.1395e-01 4.3738e-03 2.3205e-01
4.7627e-01 5.7120e-01 3.1263e-02 0:03:45 93

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 3
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

Stabilizing species-0 to enhance linear solver robustness.

Stabilizing species-4 to enhance linear solver robustness.

Stabilizing species-6 to enhance linear solver robustness.

8 9.8128e-01 3.5921e-02 2.1615e-02 2.8248e-02 3.6149e-01 4.1742e+00 1.9814e+03
4.7508e-02 1.4171e-02 1.1969e-01 3.6698e-02 2.8345e-01 8.0498e-03 2.6496e-01
4.8219e-01 3.5015e-01 2.3756e-01 0:05:43 92

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 26
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

9 3.5281e+00 2.5668e-01 1.7344e-01 1.8171e-01 4.5303e-02 1.2613e+00 2.9382e+00
3.3328e-02 1.3192e-02 9.8484e-02 3.4679e-02 4.6987e-02 1.0662e-02 7.7713e-02
5.5413e-01 1.9156e-01 1.9737e-01 0:05:08 91

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 8
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

10 1.8499e+00 1.0265e-01 7.4812e-02 7.6657e-02 1.3465e-02 2.8085e-01 2.8592e-01
1.9253e-02 1.1100e-02 5.9650e-02 2.6915e-02 1.6111e-01 9.2672e-03 1.2883e-01
5.3862e-01 1.2898e-01 2.3932e-01 0:04:58 90

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 1 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

11 1.3856e+00 4.7017e-02 3.9210e-02 4.4397e-02 9.5767e-03 3.3445e-01 5.2988e-01
3.9070e-02 9.1187e-03 4.4033e-02 2.6371e-02 5.7965e-02 6.1277e-03 1.3106e-01
4.6575e-01 4.4927e-01 1.8073e-01 0:04:31 89

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 1 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon vol o2 co2 h2o so2 n2
co c h2 ch4 time/iter

12 1.4517e+00 3.4150e-02 2.8524e-02 3.2304e-02 1.1028e-02 3.5483e-01 4.7711e-01
1.4171e-02 8.2007e-03 4.3229e-02 4.7398e-02 1.7470e-01 1.1794e-02 9.9328e-02
4.1643e-01 3.9844e-02 1.2151e-01 0:04:10 88

13 1.5080e+00 3.4267e-02 2.4733e-02 2.7726e-02 1.1503e-02 3.5556e-01 4.9690e-01
1.1288e-02 7.5986e-03 3.0269e-02 2.9821e-02 4.0046e-02 8.8634e-03 5.1045e-02
3.4060e-01 3.8802e-02 3.7580e-01 0:03:52 87

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 11 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

14 2.0330e+00 3.2633e-02 2.0419e-02 2.2631e-02 1.1133e+00 3.8133e+00 1.0610e+02
1.3460e-02 6.8319e-03 2.6542e-02 2.6928e-02 2.2769e-01 1.0571e-02 5.7192e-02
3.0744e-01 3.6484e-02 2.8289e-01 0:03:21 86

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 56 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

15 3.4773e+00 3.5303e-01 2.0374e-01 2.2938e-01 2.2549e-01 1.1637e+00 5.1718e+00
1.8086e-02 5.7528e-03 2.5372e-02 3.6312e-02 4.0966e-02 1.1940e-02 5.0762e-02
2.5085e-01 3.6125e-02 2.5616e-01 0:03:13 85

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 16 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 5 cells

16 2.6977e+00 1.8470e-01 1.3769e-01 1.2225e-01 3.0378e-02 9.5904e-01 1.4466e+00
1.2644e-02 3.7294e-03 2.4152e-02 2.8082e-02 2.1884e-01 8.0033e-03 4.1574e-02
2.4830e-01 3.9350e-02 2.0729e-01 0:03:06 84

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 14 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells

17 1.6890e+00 1.0032e-01 6.6197e-02 5.6936e-02 1.6645e-02 4.0687e-01 4.7790e-01
1.3115e-02 2.5190e-03 2.1058e-02 2.2240e-02 2.3223e-02 6.9650e-03 3.6572e-02
2.1412e-01 5.6780e-02 1.1889e-01 0:03:00 83

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

18 1.3382e+00 5.6093e-02 4.5566e-02 4.2438e-02 1.5720e-02 2.7613e-01 3.4837e-01
1.1910e-02 2.1659e-03 1.9526e-02 2.0834e-02 2.1910e-02 6.2684e-03 3.2494e-02
2.9230e-01 4.5368e-02 8.2055e-02 0:02:39 82

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 1 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

19 1.2513e+00 4.4157e-02 3.3332e-02 2.8154e-02 1.4640e-02 3.0978e-01 3.7229e-01
1.1207e-02 2.2846e-03 1.7334e-02 1.8193e-02 1.3968e+00 5.5558e-03 2.6237e-02
2.8027e-01 3.8604e-02 6.0356e-02 0:02:38 81

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 1 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells

20 1.3401e+00 3.6435e-02 2.4747e-02 2.2979e-02 1.4143e-02 3.2975e-01 3.8612e-01
1.4857e-02 2.9671e-03 1.6140e-02 1.6774e-02 2.0078e-02 6.3651e-03 2.5281e-02
2.8212e-01 3.5692e-02 8.1097e-02 0:02:37 80

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 10 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 3 cells

21 1.3580e+00 3.6043e-02 2.0717e-02 2.1584e-02 3.5460e-02 5.9739e-01 4.4686e+00
2.1184e-02 2.9188e-03 2.2205e-02 2.0513e-02 4.5055e+02 8.5837e-03 2.4680e-02
2.8321e-01 3.8178e-02 5.7141e-02 0:02:35 79

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 5 cells

22 1.5676e+00 8.2674e-02 6.3494e-02 6.1830e-02 1.5331e-02 2.1446e-01 3.8017e-01
2.3034e-02 6.0658e-03 2.1468e-02 1.9429e-02 1.0638e-02 8.8862e-03 2.8099e-02
2.5357e-01 4.3534e-02 4.0176e-02 0:02:34 78

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 5 cells

iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon vol o2 co2 h2o so2 n2
co c h2 ch4 time/iter

23 1.1618e+00 4.5057e-02 3.0838e-02 3.3065e-02 1.4581e-02 2.6682e-01 5.0320e-01
2.4095e-02 6.0590e-03 1.7612e-02 1.5344e-02 3.7583e-02 7.7600e-03 2.1174e-02
2.6628e-01 3.1337e-02 1.7968e-02 0:02:32 77

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 9 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

24 1.4442e+00 3.3359e-02 2.8233e-02 2.8743e-02 1.0777e+00 6.3096e+00 6.6802e+02
1.9768e-02 5.0062e-03 1.4176e-02 1.3212e-02 2.1404e-02 5.7654e-03 1.5292e-02
2.5261e-01 2.2208e-02 1.2772e-02 0:02:31 76

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 20 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

25 2.1482e+00 3.1934e-01 1.8052e-01 2.2558e-01 1.5939e-01 6.7030e-01 1.1930e+00
1.5214e-02 4.2929e-03 1.0343e-02 9.6537e-03 1.4020e-02 4.4351e-03 1.5129e-02
2.7235e-01 2.2072e-02 1.0307e-02 0:02:29 75

Stabilizing x-momentum to enhance linear solver robustness.

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 25 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells

26 1.5697e+00 1.5910e-01 7.2739e-02 1.3166e-01 2.6710e-02 2.8649e-01 2.7718e-01
1.5092e-02 3.5276e-03 7.4527e-03 7.0445e-03 1.0404e-02 4.2784e-03 1.3388e-02
2.4904e-01 1.7862e-02 8.4326e-03 0:02:12 74

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

27 1.1768e+00 8.8018e-02 4.3769e-02 6.6479e-02 1.4528e-02 4.2085e-01 5.7641e-01
9.5215e-03 2.8596e-03 6.1412e-03 6.4909e-03 7.9876e-03 2.9356e-03 9.7537e-03
2.1501e-01 1.8052e-02 6.7407e-03 0:02:28 73

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 2 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

28 1.0782e+00 4.7326e-02 3.2966e-02 3.9514e-02 1.1330e-02 3.6591e-01 5.1661e-01
7.0196e-03 2.3429e-03 6.0633e-03 7.3861e-03 9.7283e-03 6.6118e-03 1.1512e-02
2.9237e-01 1.2752e-02 1.1717e+00 0:02:26 72

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 2 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

29 9.5406e-01 3.2946e-02 2.3550e-02 2.6315e-02 8.6764e-03 2.8926e-01 4.7193e-01
7.8688e-03 3.3480e-03 8.3931e-03 9.0838e-03 1.3277e-02 2.9299e-03 1.6769e-02
3.8523e-01 3.9105e-02 1.6147e-02 0:02:38 71

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 35 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

30 1.1250e+00 3.3052e-02 2.4111e-02 2.3269e-02 8.3227e-03 2.5716e-01 4.9619e-01
6.6585e-03 1.2127e-02 1.0069e-02 9.3056e-03 1.4667e-02 1.0530e-02 4.9603e-02
3.8751e-01 1.0976e-01 3.6109e+01 0:02:32 70

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 40 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

31 1.0192e+00 4.6260e-02 2.2947e-02 2.3958e-02 9.1230e-03 2.7162e-01 7.8568e-01
1.0579e-02 1.3462e-02 8.8729e-03 1.0586e-02 8.3492e-03 5.9400e-03 3.2097e-02
3.6833e-01 6.2956e-02 1.4149e-02 0:02:28 69

32 7.4333e-01 4.5814e-02 2.4562e-02 2.4710e-02 8.8569e-03 4.4872e-01 1.9334e+00
8.7327e-03 8.1441e-03 1.7997e-01 1.6847e-01 4.8141e+00 5.2588e-03 1.9057e+00
3.5984e-01 3.7198e+00 1.1443e-02 0:02:24 68

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

33 1.0061e+00 4.8893e-02 3.1300e-02 3.0913e-02 2.0391e-02 2.7855e-01 4.7276e-01
8.4386e-03 4.5022e-02 3.9418e-02 4.6123e-02 1.5874e-02 5.3957e-03 1.6420e-01
3.2398e-01 1.2616e-01 1.9179e-01 0:02:20 67

iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon vol o2 co2 h2o so2 n2
co c h2 ch4 time/iter

34 7.0525e-01 3.6419e-02 2.3317e-02 2.2642e-02 2.0277e-02 3.2384e-01 4.5119e-01
1.1632e-02 3.7574e-02 1.2400e-02 1.3454e-02 3.6060e-01 3.5609e-03 7.9243e-02
3.6114e-01 8.9952e-02 2.6749e-02 0:02:17 66

35 8.9633e-01 2.6731e-02 1.7783e-02 1.7017e-02 1.2492e-02 1.7894e-01 3.3667e-01
1.0918e-02 1.6895e-02 9.6379e-03 1.0013e-02 2.4228e-02 2.3077e-03 4.4988e-02
3.8381e-01 5.6599e-02 3.0053e-01 0:02:14 65

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 42
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

36 7.6008e-01 2.7249e-02 1.7694e-02 1.7981e-02 9.5046e-03 2.3398e-01 8.0501e-01
8.3901e-03 7.1650e-03 8.6043e-03 9.2532e-03 3.5939e-01 1.7885e-03 2.8340e-02
3.0212e-01 3.5897e-02 3.6937e-02 0:02:11 64

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 1
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

37 7.8060e-01 3.0265e-02 1.8676e-02 1.9083e-02 7.8377e-03 1.7698e-01 4.4842e-01
5.9889e-03 3.4397e-03 7.7750e-03 1.0068e-02 2.9875e-02 1.6665e-03 1.7023e-02
3.2778e-01 2.1833e-02 2.6678e-01 0:01:56 63

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 7
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 10 cells

38 1.6244e+00 2.8846e-02 1.8786e-02 1.8931e-02 2.0866e-02 1.3889e+00 4.5646e+01
5.2653e-03 1.8634e-03 5.5123e-03 7.3707e-03 3.4940e-01 1.3863e-03 1.2045e-02
2.6270e-01 2.0866e-02 4.7161e-02 0:01:56 62

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 5
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 14 cells

39 8.6244e-01 1.1531e-01 5.7465e-02 5.4290e-02 1.3518e-02 1.6753e+00 5.0132e+01
6.7242e-03 1.5110e-03 4.7405e-03 6.0329e-03 2.8556e-02 1.4471e-03 1.4478e-02
2.9179e-01 1.7654e-02 2.8596e-01 0:01:56 61

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 23 cells

40 8.6257e-01 7.0048e-02 3.7766e-02 3.7289e-02 1.2476e-02 2.6145e-01 7.0824e-01
9.2444e-03 1.9600e-03 4.7348e-03 4.4433e-03 2.9707e-01 1.4453e-03 1.4821e-02
2.4644e-01 2.9973e-02 1.3888e-01 0:01:55 60

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 3
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 8 cells

41 9.7526e-01 4.5567e-02 3.0558e-02 3.7312e-02 1.0761e-02 1.4535e-01 1.4382e-01
2.8528e-02 2.1683e-03 3.3904e-03 4.6905e-03 1.0533e-01 1.1936e-03 1.9693e-02
2.2373e-01 2.3942e-02 7.6520e-02 0:01:42 59

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 3 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 4 cells

42 9.4931e-01 4.3828e-02 2.7271e-02 2.9904e-02 9.1166e-03 1.2568e-01 1.7697e-01
1.8878e-02 2.0070e-03 4.5140e-03 5.6068e-03 6.0392e-02 1.2387e-03 1.6113e-02
2.2669e-01 2.0486e-02 4.9354e-02 0:01:44 58

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 3 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 3 cells

43 9.1734e-01 4.3621e-02 2.2415e-02 2.4722e-02 1.5230e-02 7.4223e-02 2.6363e-01
1.4081e-02 1.9457e-03 3.6630e-03 4.4074e-03 1.5975e-01 8.4206e-04 1.1156e-02
2.1993e-01 1.5897e-02 2.3964e-01 0:01:44 57

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 3 cells

44 9.6664e-01 4.6780e-02 2.0921e-02 2.2890e-02 1.6095e-02 7.1400e-02 1.0781e-01
1.1140e-02 1.8151e-03 3.2572e-03 3.8409e-03 1.0702e-01 1.3732e-03 1.4833e-02
1.8507e-01 3.5019e-02 1.6804e-01 0:01:44 56

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells

iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon vol o2 co2 h2o so2 n2
co c h2 ch4 time/iter

45 1.0006e+00 3.9004e-02 2.2460e-02 2.2381e-02 1.6071e-02 5.4084e-02 1.1288e-01
1.1645e-02 1.5359e-03 2.7108e-03 3.0758e-03 6.1441e-02 9.3895e-04 1.1038e-02
1.9273e-01 2.3189e-02 9.1020e-02 0:01:33 55

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells

46 1.0295e+00 4.4550e-02 2.3056e-02 2.2796e-02 1.8299e-02 5.2325e-02 4.1175e-02
9.0116e-03 1.3917e-03 2.7642e-03 3.1078e-03 2.2090e-01 9.8626e-04 1.1964e-02
1.4141e-01 2.5359e-02 6.9222e-02 0:01:35 54

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4 faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells
47 1.0974e+00 4.5961e-02 2.3264e-02 2.2916e-02 1.5080e-02 8.3937e-02 8.8481e-02
7.6708e-03 1.2702e-03 2.3678e-03 3.4273e-03 1.4846e-01 9.2229e-04 1.0315e-02
1.4061e-01 1.6388e-02 3.1663e-01 0:01:36 53

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4 faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells
48 1.1808e+00 5.1276e-02 2.4019e-02 2.3363e-02 1.5995e-02 6.2530e-02 4.5501e-02
6.8597e-03 1.2020e-03 2.1299e-03 2.6801e-03 8.0943e-02 8.3546e-04 9.3025e-03
1.1222e-01 1.6441e-02 1.9977e-01 0:01:36 52

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells
49 1.3134e+00 5.4277e-02 2.5683e-02 2.5057e-02 2.4790e-02 5.0965e-02 4.7959e-02
6.1976e-03 1.4409e-03 2.4084e-03 3.0335e-03 5.8262e-02 7.8822e-04 1.0939e-02
1.1129e-01 2.0128e-02 1.1070e-01 0:01:36 51

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells
50 1.4538e+00 5.6255e-02 2.5290e-02 2.7097e-02 2.5185e-02 1.0570e-01 1.0882e-01
9.0614e-03 1.9037e-03 2.3122e-03 2.4780e-03 2.8320e-02 9.1032e-04 1.4567e-02
8.1557e-02 2.6583e-02 8.2360e-02 0:01:35 50

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells
51 1.6285e+00 5.5395e-02 2.5723e-02 2.5985e-02 2.3249e-02 1.1698e-01 1.7004e-01
1.5310e-02 2.5922e-03 4.5043e-03 3.9259e-03 1.6466e-02 1.0219e-03 1.8430e-02
6.7118e-02 3.0704e-02 1.8307e-02 0:01:44 49

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells
52 1.7365e+00 4.9243e-02 2.6307e-02 2.6205e-02 2.5350e-02 9.1454e-02 1.4146e-01
4.0488e-02 3.5057e-03 1.9131e-02 1.9481e-02 8.8217e-03 1.1616e-03 1.0106e-01
6.8679e-02 1.3427e-01 8.1633e-03 0:02:00 48

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells

53 1.8145e+00 4.5858e-02 2.4972e-02 2.5256e-02 2.6075e-02 1.1559e-01 1.5889e-01
1.0390e-02 4.3943e-03 1.0562e-02 7.3528e-03 1.1692e-02 5.8559e-03 1.3240e-02
5.4389e-02 1.3490e-02 4.8432e-03 0:02:02 47

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells

54 2.0057e+00 4.9041e-02 2.4425e-02 2.4255e-02 1.8887e-02 1.5437e-01 2.2147e-01
4.2490e-03 6.6129e-03 4.1295e-03 3.4541e-03 2.1020e-02 3.3782e-03 2.3252e-02
4.5851e-02 3.0252e-02 2.7773e-03 0:02:03 46

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 1 cells

55 2.1447e+00 4.1386e-02 2.5400e-02 2.4392e-02 2.0300e-02 1.4362e-01 2.2975e-01
5.8321e-03 5.6777e-03 9.7868e-03 1.3041e-02 6.0491e-03 2.5275e-03 1.1168e-02
3.7641e-02 1.9318e-02 2.9216e-03 0:01:54 45

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells

iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon vol o2 co2 h2o so2 n2
co c h2 ch4 time/iter

56 2.1539e+00 3.9792e-02 2.4453e-02 2.4522e-02 2.1953e-02 1.0817e-01 2.1385e-01
4.2068e-01 1.4637e-02 7.7433e-02 8.1045e-03 4.8024e-03 1.2494e-03 1.2115e-01
3.1105e-02 2.7366e-01 3.0626e-03 0:01:56 44

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 10 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

57 2.6120e+00 3.7954e-02 2.4101e-02 2.4762e-02 1.9939e-02 2.0460e-01 2.6844e-01
5.4524e-03 1.6957e-02 4.8479e-03 3.8040e-03 2.9120e-03 5.7678e-03 3.5820e-02
2.7587e-02 8.2764e-02 3.8696e-03 0:01:56 43

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 10 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells

58 2.6837e+00 3.6125e-02 2.2868e-02 2.3924e-02 1.6134e-02 8.9557e-02 2.3648e-01
3.6954e-03 4.4151e-03 5.3080e-03 4.5231e-03 2.3566e-03 8.1046e-03 2.5000e-02
2.4331e-02 5.0060e-02 3.1780e-03 0:01:56 42

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 8 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells
59 2.8740e+00 3.3568e-02 2.2194e-02 2.2939e-02 1.6707e-02 8.3853e-02 1.9377e-01
2.8418e-03 3.2908e-03 3.3120e-03 7.0198e-03 2.2824e-03 3.0179e-03 9.7788e-03
2.1336e-02 5.0527e-02 1.3232e+03 0:01:55 41
Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 8
faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 3 cells
60 2.8169e+00 3.3625e-02 2.1136e-02 2.1748e-02 1.9052e-02 9.8509e-02 2.2587e-01
4.5933e+00 3.4320e-03 2.7037e-01 4.0993e-03 1.1689e-03 1.8608e-03 1.6899e-02
1.9877e-02 6.2106e-01 4.3918e-03 0:01:54 40
Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 9
faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 1 cells
61 3.2859e+00 3.4181e-02 2.1542e-02 2.2434e-02 1.6795e-02 1.8173e-01 2.9932e-01
4.2931e-03 5.2488e-03 4.2953e-03 3.3522e-03 1.1514e-02 6.4425e-03 2.6014e-02
1.8259e-02 7.9375e-02 8.9378e-03 0:01:45 39
Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 9
faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 1 cells
62 3.4824e+00 3.3115e-02 2.0536e-02 2.0874e-02 1.4144e-02 1.3342e-01 3.0733e-01
2.0339e-03 2.5808e-03 4.7572e-03 3.4014e-03 7.8206e-03 3.8447e-03 1.6824e-02
1.6463e-02 4.5073e-02 4.4581e-03 0:01:37 38
Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 7
faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 1 cells
63 3.5759e+00 3.3281e-02 1.9628e-02 2.0071e-02 1.3828e-02 1.3745e-01 3.1875e-01
4.4325e-03 1.8975e-03 3.6866e-03 3.4770e-03 4.2995e-03 2.5173e-03 5.2228e-03
2.1202e-02 4.5776e-02 3.0231e-03 0:01:45 37
Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6
faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

64 3.8695e+00 3.3936e-02 1.9784e-02 2.0704e-02 1.2988e-02 1.3088e-01 3.1920e-01
2.1276e-03 1.6938e-03 2.7147e-03 1.3936e-01 4.1118e-03 1.3978e-03 3.0982e-03
1.7083e-02 3.2757e-02 4.0192e-03 0:01:36 36
Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6
faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01
65 3.3937e+00 3.5531e-02 1.9403e-02 1.9610e-02 1.1696e-02 1.1604e-01 3.2239e-01
1.2509e-03 2.1881e-03 2.0662e-03 3.4562e-03 4.9590e-03 1.5624e-02 6.3650e-03
2.4800e-02 4.8067e-02 4.7444e-03 0:01:29 35

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 5 faces
 bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01
 66 3.4097e+00 3.5560e-02 1.9692e-02 1.9259e-02 1.1043e-02 1.0820e-01 3.1770e-01
 3.3580e-03 2.9744e-03 3.6742e-03 4.8333e-03 3.6860e-03 3.0391e-03 8.2502e-03
 1.8620e-02 7.1352e-02 3.6341e-03 0:01:29 34
 Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 5 faces
 bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon vol o2 co2 h2o so2 n2
 co c h2 ch4 time/iter
 67 3.6202e+00 3.6566e-02 1.9676e-02 1.9250e-02 1.0153e-02 9.9023e-02 3.3256e-01
 3.4332e-03 3.3874e-03 1.0362e-02 2.3669e-03 3.9128e-03 1.8941e-03 8.3391e-03
 1.9753e-02 6.9905e-02 4.0473e-03 0:01:29 33
 Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 5 faces
 bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01
 68 3.8360e+00 3.7056e-02 1.9562e-02 1.9276e-02 9.0846e-03 1.0547e-01 3.9213e-01
 2.8117e-03 3.3824e-03 1.1164e-02 2.2793e-03 1.6957e-03 1.8469e-03 6.8940e-03
 2.3306e-02 6.9204e-02 1.7750e-03 0:01:28 32
 Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 5 faces
 bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01
 69 4.1766e+00 3.6863e-02 1.9731e-02 1.9137e-02 8.5404e-03 7.2784e-02 3.1751e-01
 3.3920e-03 3.2099e-03 7.6968e-03 1.5279e-03 5.0285e+01 1.1520e-03 5.7991e-03
 1.9601e-02 7.0007e-02 5.5111e+01 0:01:27 31
 Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 5 faces
 bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01
 70 4.6462e+00 3.6497e-02 1.9688e-02 1.8863e-02 8.2869e-03 5.7780e-02 2.5851e-01
 3.1868e-03 2.8041e-03 5.7075e-03 4.2134e-03 4.1350e-03 1.1417e-03 5.3848e-03
 2.1951e-02 7.0341e-02 4.1349e-03 0:01:19 30
 Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4 faces
 bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01
 71 5.1231e+00 3.6646e-02 1.9714e-02 1.8304e-02 8.1635e-03 5.0714e-02 2.2481e-01
 2.0975e-03 2.3968e-03 3.6059e-03 2.7614e-03 2.8126e-03 7.7918e-04 5.2875e-03
 2.0096e-02 6.3432e-02 2.8125e-03 0:01:19 29
 Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4 faces
 bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01
 72 5.6569e+00 3.6470e-02 2.0159e-02 1.8212e-02 8.1497e-03 3.7079e-02 1.2958e-01
 1.9345e-03 2.0465e-03 2.6984e-03 2.1312e-03 2.0868e-03 9.0198e-04 4.5399e-03
 1.9429e-02 5.4519e-02 2.0867e-03 0:01:12 28
 Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 5 faces
 bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

73 6.1507e+00 3.5660e-02 2.0580e-02 1.8211e-02 8.3308e-03 3.6706e-02 2.0696e-01
2.2394e-03 2.1373e-03 2.0319e-03 1.0638e-03 1.0863e-03 6.1805e-04 5.6018e-03
1.9059e-02 7.8962e-02 1.0862e-03 0:01:12 27

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 206 cells

74 6.6407e+00 3.3730e-02 2.0144e-02 1.7582e-02 8.2887e-03 1.7689e-01 1.5173e+01
4.4927e-03 2.7875e-03 1.8601e-03 2.5450e-03 1.4582e-03 9.5031e-04 6.1748e-03
2.0774e-02 1.0166e-01 1.4591e-03 0:01:06 26

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 5
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 288 cells

75 6.3369e+00 3.6545e-02 2.2983e-02 1.9910e-02 8.6392e-03 4.0273e-01 3.1086e-01
1.1760e-02 3.2640e-03 1.5468e-03 1.8028e-03 8.4674e-04 6.6333e-04 4.1278e-03
2.2681e-02 9.7703e-02 8.4727e-04 0:01:01 25

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 303 cells

76 6.5123e+00 3.2405e-02 2.0649e-02 1.7725e-02 8.6403e-03 1.1020e-01 3.0266e-01
1.1010e-02 3.4718e-03 3.0835e-03 1.6320e-03 9.5568e-04 5.0165e-04 4.1907e-03
2.1793e-02 9.4076e-02 9.5601e-04 0:00:56 24

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 296 cells

77 6.5375e+00 2.9696e-02 1.9731e-02 1.6906e-02 8.6639e-03 4.9063e-02 1.8060e-01
7.8553e-03 3.5812e-03 1.4706e-03 8.3012e-04 6.3354e-04 3.8144e-04 2.4625e-03
2.0989e-02 7.6002e-02 6.3349e-04 0:00:52 23

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 275 cells

iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon vol o2 co2 h2o so2 n2
co c h2 ch4 time/iter

78 6.4744e+00 2.8073e-02 1.8883e-02 1.6050e-02 8.9522e-03 3.4449e-02 9.9995e-02
9.0417e-03 4.0054e-03 8.7820e-04 9.3312e-04 5.9998e-04 2.2413e-04 2.1146e-03
2.1448e-02 6.7225e-02 5.9985e-04 0:00:49 22

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 4
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 256 cells
79 6.7338e+00 2.6643e-02 1.7964e-02 1.5412e-02 9.2379e-03 3.2482e-02 1.0161e-01
4.2628e-03 4.4649e-03 7.2602e-04 5.3035e-04 5.1233e-04 4.1196e-04 1.9634e-03
2.2163e-02 6.2405e-02 5.1219e-04 0:00:46 21

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 228 cells
80 6.8993e+00 2.6976e-02 1.7539e-02 1.4885e-02 9.0627e-03 3.9352e-02 1.8747e-01
3.5990e-03 5.0260e-03 4.8197e-04 4.7828e-04 7.1005e-04 2.5465e-04 1.6285e-03
2.3938e-02 5.8440e-02 7.0981e-04 0:00:47 20

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 7 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 213 cells
81 7.0115e+00 2.8078e-02 1.7471e-02 1.5228e-02 8.6658e-03 4.2316e-02 2.7400e-01
2.0449e-03 5.4763e-03 5.2617e-04 3.5253e-04 3.8901e-04 1.8458e-04 1.5098e-03
3.0247e-02 5.5334e-02 3.8890e-04 0:00:43 19

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 7 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 190 cells
82 7.3543e+00 2.3895e-02 1.6171e-02 1.4506e-02 8.3479e-03 3.9997e-02 9.1687e-02
1.5760e-03 5.4922e-03 4.4341e-04 4.8964e-04 5.8986e-04 2.1345e-04 1.1056e-03
3.3732e-02 4.8022e-02 5.8966e-04 0:00:40 18

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 7 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 72 cells
83 7.5691e+00 2.6412e-02 1.6917e-02 1.4777e-02 8.2098e-03 4.0070e-02 1.7901e-01
1.0364e-03 5.2279e-03 6.0514e-04 2.8328e-04 4.2628e-04 1.3177e-04 1.1955e-03
3.0710e-02 5.1198e-02 4.2615e-04 0:00:37 17

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 5 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 16 cells
84 7.1805e+00 2.2619e-02 1.5528e-02 1.3859e-02 8.2522e-03 5.9339e-02 3.2274e-01
2.3214e-03 4.3438e-03 5.2570e-04 2.0527e-04 3.4029e-04 1.0042e-04 8.4154e-04
2.6657e-02 4.1288e-02 3.4021e-04 0:00:37 16

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 4 cells

85 6.2915e+00 2.5965e-02 1.6467e-02 1.5121e-02 7.5638e-03 6.3395e-02 3.4479e-01
2.0744e-03 3.6600e-03 5.0873e-04 1.4260e-03 2.1434e-04 4.0701e-04 9.0956e-04
2.4728e-02 4.6359e-02 2.1431e-04 0:00:37 15

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 1 cells

86 6.3770e+00 2.4132e-02 1.6607e-02 1.4972e-02 7.7512e-03 8.1751e-02 3.9493e-01
2.2392e-03 3.6578e-03 3.1617e-04 1.0836e-03 3.8353e-03 3.1160e-04 2.0849e-03
2.1246e-02 1.0252e-01 3.8358e-03 0:00:33 14

Stabilizing x-momentum to enhance linear solver robustness.

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 7
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 84 cells

87 6.7381e+00 2.4449e-02 1.7454e-02 1.5963e-02 1.1025e-01 1.3236e+00 5.1585e+02
8.0635e-03 3.8022e-03 7.5868e-04 8.2451e-04 2.9006e-03 2.4367e-04 2.5160e-03
1.8897e-02 1.2152e-01 2.9009e-03 0:00:30 13

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 9
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 52 cells

88 9.0317e+00 1.5289e-01 2.5454e-02 2.6258e-02 1.8678e-02 6.5165e-01 5.9491e-01
8.4126e-03 4.7388e-03 6.9454e-04 1.2371e-02 2.2222e-03 5.8375e-04 4.9761e-03
2.6805e-02 1.8512e-01 2.2224e-03 0:00:29 12

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 9
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 10 cells

iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon vol o2 co2 h2o so2 n2
co c h2 ch4 time/iter

89 7.0815e+00 4.7564e-02 2.3360e-02 2.2860e-02 9.5542e-03 3.5139e-01 3.6495e-01
1.9888e-02 6.6919e-03 2.2688e-03 9.3564e-03 7.1777e-02 4.5977e-04 1.3813e-02
2.5085e-02 1.3057e-01 7.3412e-02 0:00:26 11

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 7
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

90 7.1545e+00 3.1454e-02 2.0711e-02 2.0047e-02 1.2137e-02 2.6342e-01 4.4100e-01
3.5605e-02 8.0296e-03 1.9806e-03 6.9970e-03 5.1953e-02 1.4068e-03 1.1791e-02
3.4164e-02 1.4579e-01 5.2958e-02 0:00:23 10

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6
faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

91 7.6835e+00 3.1107e-02 1.9150e-02 1.8719e-02 1.1714e-02 2.0464e-01 3.6033e-01
3.2385e-02 8.8144e-03 5.4346e-03 3.6104e-03 3.9925e-02 8.1431e-04 2.3255e-02
3.5058e-02 1.1729e-01 4.0592e-02 0:00:20 9

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

92 7.1258e+00 2.7496e-02 1.9002e-02 1.8945e-02 1.3916e-02 2.2156e-01 5.3012e-01
2.2196e-02 9.3400e-03 4.0723e-03 1.0501e-02 2.0036e-02 1.9974e-03 4.1914e-02
5.1171e-02 2.4163e-01 2.0362e-02 0:00:17 8

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 8 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

93 7.5184e+00 2.7951e-02 1.7620e-02 1.8319e-02 1.4111e-02 1.0920e-01 3.7209e-01
1.6214e-02 9.0131e-03 2.7989e-03 8.3026e-03 1.6790e+00 1.5404e-03 6.4158e-02
5.1686e-02 2.8650e-01 1.6471e+00 0:00:16 7

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 7 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

94 6.4097e+00 2.5233e-02 1.7928e-02 1.8833e-02 1.5948e-02 1.2207e-01 6.1250e-01
1.4467e-02 1.0455e-02 3.5943e-03 8.0857e-03 5.9720e-03 1.3412e-03 8.3196e-02
5.3451e-02 2.4529e-01 5.9817e-03 0:00:15 6

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 10 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 21 cells

95 6.5135e+00 2.7158e-02 1.7097e-02 1.8012e-02 1.7003e-02 5.4409e-02 4.7484e-01
1.2469e-02 1.3276e-02 2.2487e-03 3.9951e-03 5.6586e+00 8.3682e-04 7.8209e-02
4.0204e-02 1.7215e-01 5.6158e+00 0:00:14 5

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 10 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 4 cells

96 6.8575e+00 2.3816e-02 1.7067e-02 1.7738e-02 1.8771e-02 3.9928e-02 3.8967e-01
1.1335e-02 1.2868e-02 5.3833e-03 2.5908e-03 5.5857e-03 1.2685e-03 5.4843e-02
3.5282e-02 1.0741e-01 5.5873e-03 0:00:11 4

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 10 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

97 6.7074e+00 2.4676e-02 1.6512e-02 1.6634e-02 1.8831e-02 3.0961e-02 2.5987e-01
1.1264e-02 1.0657e-02 7.8305e-03 3.6486e-03 1.1968e+02 9.8002e-04 5.4317e-02
2.8284e-02 9.8963e-02 1.1529e+02 0:00:08 3

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 6 faces

bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

98 5.3137e+00 2.7113e-02 1.7453e-02 1.7156e-02 1.7481e-02 2.5538e-02 2.2764e-01
1.2883e-02 5.7705e-03 3.5813e-03 2.7712e-03 4.7122e-03 1.7180e-03 4.1419e-02
2.1537e-02 6.0194e-02 4.7123e-03 0:00:05 2

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 5 faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells
99 5.3301e+00 2.4960e-02 1.7727e-02 1.7724e-02 1.6022e-02 2.4631e-02 2.5461e-01
1.3101e-02 2.7732e-03 3.7266e-03 1.9671e-03 3.0297e-03 1.0527e-03 3.2294e-02
1.7362e-02 4.8201e-02 3.0298e-03 0:00:03 1

Warning: boundary Mach number exceeds maximum limit on mass-flow-inlet-8 for 8 faces
bounding Mach number to maximum limit =9.800000e-01

iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon vol o2 co2 h2o so2 n2
co c h2 ch4 time/iter
100 5.8567e+00 3.5607e-02 2.5391e-02 2.1381e-02 1.4423e-02 3.0334e-02 9.6276e-01
1.2511e-02 1.8268e-03 2.3752e-03 1.1889e-03 1.4226e-01 1.1115e-03 1.6413e-02
2.8746e-02 3.4741e-02 1.4208e-01 0:00:00 0

Writing data to C:\Users\Win\gasificador_files\dp0\FLU-8\Fluent\SYS.ip ...

x-coord
y-coord
z-coord
pressure
x-velocity
y-velocity
z-velocity
temperature
k
epsilon
species-10
species-9
species-8
species-7
species-6
species-5
species-4
species-3
species-2
species-1
species-0
hyb_init-0
hyb_init-1
Done.

Calculation complete.