UNIVERSIDAD DE ORIENTE

NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN CON FLUJO TORBELLINO DEL AIRE EN EL QUEMADOR EN UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN CONTINUA

Realizado por:

Br. Jesús Enrique Centeno Pérez

Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como

Requisito Parcial para Optar al Título de

INGENIERO MECÁNICO

Barcelona, Diciembre 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE

NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN CON FLUJO TORBELLINO DEL AIRE EN EL QUEMADOR EN UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN CONTINUA

ASESOR:

Prof. Henry Espinoza.

Asesor Académico

Barcelona, Diciembre 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE

NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN CON FLUJO TORBELLINO DEL AIRE EN EL QUEMADOR EN UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN CONTINUA

JURADO:

El jurado hace constar que asignó a esta tesis la calificación de:

Prof. Henry Espinoza.

Asesor Académico

Prof. Carlos Da'Silva

Jurado Principal

Prof. Yordy González

Jurado Principal

Barcelona, Diciembre 2009

RESOLUCIÓN

De acuerdo al Artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado.

"Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines, con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario".

DEDICATORIA

Una dedicatoria muy especial con cariño a Dios, a mis Padres, a mi Familia, a mi novia, a todos mis amigos y compañeros de estudios.

Jesús Enrique Centeno.

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

A mis Padres.

A mi Familia.

A mi Novia.

A mis Amigos y Compañeros.

Al profesor Henry Espinoza por guiarme en la investigación.

Al Centro de Termofluidodinámica y Mantenimiento (CTYM) del Departamento de Ingeniería Mecánica por prestar sus instalaciones para realizar este trabajo de investigación.

Jesús Enrique Centeno.

RESUMEN

En esta investigación se estudia el comportamiento del proceso de combustión propano-aire en la cámara de combustión continua Hilton ubicada en el laboratorio de Termodinámica del Departamento de Mecánica de la Universidad de Oriente, con el objetivo fundamental de simular numéricamente el proceso de combustión mediante una herramienta de Dinámica de Fluidos Computacional (ANSYS CFX 11.0). El modelo computacional está basado en las características geométricas y condiciones físicas de operación de la cámara. Discretizando el dominio del modelo con el método de discretización de volúmenes finitos. Para considerar la interacción química turbulenta, se implementó el modelo k-ε, la cinética de la reacción se estudió usando el modelo de combustión no premezclada de Disipación de Remolino. El análisis del proceso de combustión se llevó a cabo mediante la predicción de los campos de velocidad, presión y temperatura generados en la simulación numérica que brindaron características resaltantes para una mayor comprensión de este proceso que es de gran interés a nivel industrial. Obteniendo como conclusión principal que los campos de velocidad y temperatura generados en las simulaciones están condicionados por la por las condiciones operacionales y la configuración geométrica de la cámara de combustión.

JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Actualmente la tendencia a nivel mundial es no solo estudiar sino también implementar modelos energéticos que contribuyan a la conservación del planeta, el gas propano surge dentro de estos modelos como una forma de energía versátil y limpia. A nivel industrial, implementándolo en equipos como calderas y cámaras de combustión produce ventajas significativas dado que incrementa la vida útil de los equipos y reduce los costos de mantenimiento. Una comprensión adecuada de los factores que afectan la combustión eficiente del propano comercial es por lo tanto esencial para la industria y toda persona involucrada en el estudio del uso de la energía. Este trabajo de investigación pretende, en primer lugar, desarrollar conocimiento y capacidad para el análisis de procesos de combustión industrial que puedan ser aplicados en el diseño y mejoras de este tipo de proceso tan importante para la industria. En segundo lugar, se pretende evaluar la utilidad de la aplicación de técnicas de dinámica de fluidos computacional para el estudio de procesos de combustión. Todo este estudio permitirá desarrollar el conocimiento necesario para lograr que los procesos de combustión industrial se desarrollen de la manera más eficiente posible, con el consecuente ahorro de combustible y el menor impacto ambiental.

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.4 Diagrama del proceso de simulación CFD. [9] 44

Figura 2.8. Superficie del volumen de control. [9] 52

Figura 2.9. Elemento de la malla. [9] 54

Figura 3.1 Unidad de Combustión Continua. [3] 63

Figura 3.2 Dimensiones de la cámara de combustión.[Fuente propia] 68

Figura 3.3 Vista global del dominio físico de la unidad de combustión.[Fuente propia] 69

Figura 3.4 Vista seccionada a través del plano medio del dominio físico de la unidad de combustión. [Fuente propia] 69

Figura 3.5 Mallado no estructurada para el dominio físico enfatizando las entradas de fluidos.[Fuente propia] 72

Figura 3.6 Mallado no estructurada para el dominio físico enfatizando la salida de gases de escape. [Fuente propia] 73

Figura 3.7 Línea de registro del perfil de temperatura en el ducto de salida de los gases. 78

Figura 3.8 Línea de registro del perfil de temperatura en la cámara cilíndrica.[Fuente propia] 79

Figura 4.1 Línea de registro de perfil de temperatura en la cámara cilíndrica..... 103

Figura 4.2 Perfiles de Temperatura obtenidos en la cámara cilíndrica para las diversas mallas simuladas. 103

Figura 4.3 Línea de registro de perfil de temperatura en la cámara cilíndrica..... 104

Figura 4.4 Perfiles de Temperatura obtenidos en la zona de gases de escape para las diversas mallas simuladas. 105

Figura 4.5 Temperatura promedio obtenidas en la zona de gases de escape para las diversas mallas simuladas. 106

Figura 4.6 Perfil de Temperaturas para una relación A/C de 90/8.5..... 110

Figura 4.7 Perfil de Temperaturas para una relación A/C de 100/8.5..... 110

Figura 4.8 Perfil de temperaturas para una relación A/C de 110/8.5 111

Figura 4.9 Perfil de temperaturas para una relación A/C de 120/8.5 111

Figura 4.10 Perfil de temperaturas para una relación A/C de 135/8.5 112

Figura 4.11 Perfil de temperaturas para una relación A/C de 153/8.5 112

Figura 4.12 Efecto de la relación A/C sobre la temperatura de gases de escape 114

Figura 4.13 Perfil de velocidades para una relación A/C de 90/8.5..... 115

Figura 4.14 Perfil de velocidades para una relación A/C de 100/8.5..... 116

Figura 4.15 Perfil de velocidades para una relación A/C de 110/8.5..... 116

Figura 4.16 Perfil de velocidades para una relación A/C de 120/8.5..... 117

Figura 4.17 Perfil de velocidades para una relación A/C de 135/8.5..... 117

Figura 4.18 Perfil de velocidades para una relación A/C de 153/8.5..... 118

Figura 4.19 Perfil de presiones para una relación A/C de 90/8.5 119

Figura 4.20 Perfil de presiones para una relación A/C de 100/8.5 120

Figura 4.21 Perfil de presiones para una relación A/C de 110/8.5 120

Figura 4.22 Perfil de presiones para una relación A/C de 120/8.5 121

Figura 4.23 Perfil de presiones para una relación A/C de 135/8.5 121

Figura 4.24 Perfil de presiones para una relación A/C de 153/8.5 122

Figura 4.25 Líneas de corriente tridimensionales generadas en el proceso de combustión 123

Figura 4.26 Líneas de corriente bidimensionales generadas para la relación aire/combustible de 90/8,5 124

Figura 4.27 Líneas de corriente bidimensionales generadas para la relación aire/combustible de 100/8,5 125

Figura 4.28 Líneas de corriente bidimensionales generadas para la relación aire/combustible de 110/8,5 125

Figura 4.29 Líneas de corriente bidimensionales generadas para la relación aire/combustible de 120/8,5 126

Figura 4.30 Líneas de corriente bidimensionales generadas para la relación aire/combustible de 135/8,5 126

Figura 4.31 Líneas de corriente bidimensionales generadas para la relación aire/combustible de 155/8,5 127

Figura 4.32 Perfil de Temperaturas en el plano horizontal para una relación A/C de 90/8,5 129

Figura 4.33 Perfil de velocidades en el plano horizontal para una relación A/C de 90/8,5 129

Figura 4.34 Líneas de corriente bidimensionales en el plano horizontal generadas para la relación aire/combustible de 90/8,5 130

Figura 4.35 Perfil de Temperaturas en el plano horizontal para una relación A/C de 100/8,5 130

Figura 4.36 Perfil de velocidades en el plano horizontal para una relación A/C de 100/8,5 130

Figura 4.37 Líneas de corriente bidimensionales en el plano horizontal generadas para la relación aire/combustible de 100/8,5 131

Figura 4.38 Perfil de Temperaturas en el plano horizontal para una relación A/C de 110/8,5 132

Figura 4.39 Perfil de velocidades en el plano horizontal para una relación A/C de 110/8,5 132

Figura 4.40 Líneas de corriente bidimensionales en el plano horizontal generadas para la relación aire/combustible de 110/8,5 133

Figura 4.41 Perfil de Temperaturas en el plano horizontal para una relación A/C de 120/8,5 133

Figura 4.42 Perfil de velocidades en el plano horizontal para una relación A/C de 120/8,5.....134

Figura 4.43 Líneas de corriente bidimensionales en el plano horizontal generadas para la relación aire/combustible de 120/8,5.....134

Figura 4.44 Perfil de Temperaturas en el plano horizontal para una relación A/C de 135/8,5.....135

Figura 4.45 Perfil de velocidades en el plano horizontal para una relación A/C de 135/8,5.....135

Figura 4.46 Líneas de corriente bidimensionales en el plano horizontal generadas para la relación aire/combustible de 135/8,5.....136

Figura 4.47 Perfil de Temperaturas en el plano horizontal para una relación A/C de 155/8,5.....136

Figura 4.48 Perfil de velocidades en el plano horizontal para una relación A/C de 155/8,5.....137

Figura 4.49 Líneas de corriente bidimensionales en el plano horizontal generadas para la relación aire/combustible de 155/8,5.....137

Figura A.1 Curvas de Residual en Norma RMS para las Ecuaciones De Masa y Momento .....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura A.2 Curvas de Residual en Norma RMS para la Ecuación de la Energía**¡Error! Marcador no de**

Figura A.3 Curvas de Residual en Norma RMS para la Energía Cinética Turbulenta y su Tasa de Disipación.....**¡Error! Marcador no definido.**

Las condiciones iníciales definen el estado del fluido en el instante inicial considerado como origen para la evolución temporal (t = 0). Por tanto, para la correcta definición de un problema se deberá conocer el valor que tienen todas las variables en ese instante. Muchas veces, en problemas resueltos mediante técnicas numéricas esto es imposible, con lo que se ha de buscar una alternativa. La más sencilla y habitual consiste en dar a todas las variables un valor cero, asumiendo que, si se avanza suficientemente en el tiempo, se llega a un estado estacionario, o periódico, independientemente de la solución inicial, según las condiciones de contorno sean constantes o periódicas. Tiene como ventaja la sencillez de implementación, pero tiene una gran desventaja, pues si dicha solución inicial se aparta bastante de la solución real, puede dar lugar a problemas de convergencia en cuanto a la resolución de las ecuaciones [9].

En función del tipo de evolución temporal, se clasifican las ecuaciones diferenciales y, por tanto los problemas de origen, en elípticas, parabólicas e hiperbólicas. Una ecuación diferencial se clasifica dentro de un grupo u otro dependiendo de la forma de dependencia espacio-temporal de la evolución de las variables.

Las condiciones de contorno pueden ser de varios tipos. Las más comunes en la práctica son:

a) Condición de contorno tipo Dirichlet. La variable dependiente es conocida en la frontera física del problema.
b) Condición de contorno tipo Neumann. Se conoce en la frontera física del problema el valor del gradiente normal de la variable dependiente.
c) Condición de contorno tipo Robin. La condición conocida constituye una combinación lineal de los tipos anteriores.
d) Condición de contorno Mixtas. En una zona de la frontera física se tienen condiciones de contorno Dirichlet y en otras condiciones del tipo Neumann.

La correcta definición de las condiciones de contorno constituye una parte fundamental en la definición de un problema numérico.

2.4.5 Ecuaciones de Conservación

Las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos son ecuaciones que se fundamentan en los principios de conservación. Además de estas ecuaciones básicas, existen otras adicionales que tratan de resolver aspectos más específicos a la par que complejos, como son la turbulencia.

Las tres ecuaciones principales que resuelve el método de volúmenes finitos son:

- Ecuación de la conservación de la masa o continuidad.
- Ecuación de conservación del momento.
- Ecuación de la conservación de la energía.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones se obtienen aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido. Haciendo esto se obtiene la llamada formulación integral de las ecuaciones. Para llegar a su formulación diferencial se manipulan aplicando diferentes teoremas matemáticos, llegando así a la llamada formulación diferencial, que generalmente es más útil para la resolución de los problemas que se plantean en la mecánica de fluidos [11].

2.4.6 Metodología de Discretización del Dominio Computacional

Para discretizar el dominio espacial y temporal continuo del problema debe ser sustituido por uno discreto compuesto de puntos en una retícula o celda y niveles de tiempo. La discretización ideal utiliza el menor número de puntos de retícula/celda y menores niveles de tiempo para obtener soluciones con la precisión deseada.

Las ecuaciones diferenciales parciales que rigen el problema deben ser reemplazadas por un conjunto de ecuaciones algebraicas en los puntos/celdas de retícula y los niveles de tiempo como su dominio. El proceso de convertir las ecuaciones de transporte gobernantes en un grupo de ecuaciones de valores discretos de la variable, se denomina proceso de discretización. Existen varias técnicas de discretización, dependiendo de los principios en que se basen. Las más usadas son: diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. En situaciones ideales, las ecuaciones algebraicas conocidas como ecuaciones de diferencias finitas, elementos finitos o volúmenes finitos deberán describir el mismo ámbito físico que el descrito por las ecuaciones diferenciales parciales. Aquí describiremos el método de volúmenes finitos, que es el utilizado por el programa CFX.

La metodología, en primer lugar, convierte las ecuaciones diferenciales en su análogo numérico, mediante la transformación física de las ecuaciones.

Las expresiones resultantes son utilizadas para implementar las derivadas de las ecuaciones en una celda cualquiera. De esta manera, se puede hallar el análogo numérico de las ecuaciones diferenciales para cada volumen finito, y después resolver el sistema de ecuaciones algebraicas que resultan.

Una vez discretizadas las ecuaciones diferenciales, se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas, que se pueden escribir en notación matricial, y estas pueden ser resueltas a través de dos tipos de métodos de solución: los directos y los iterativos.

Los métodos directos son aquellos que necesitan la inversión de la matriz completa. Los métodos iterativos tratan de hallar la solución partiendo de una solución estimada y calculando, a partir de ella, una solución mejorada, acercándose en cada iteración a la solución general.

2.4.6.1 Método de los Volúmenes Finitos

Uno de los aspectos clave en la metodología numérica es el lograr una adecuada modelización discreta del medio continuo. El método de volúmenes finitos es actualmente la metodología de discretización más popular en CFD.

Este es un enfoque integral en el que las ecuaciones de transporte son resueltas para cada celda convertida en un volumen de control, en otras palabras, las ecuaciones gobernantes son solucionadas sobre volúmenes de control discretos.

El método de los volúmenes finitos se basa en la discretización de las ecuaciones de Navier-Stokes. El dominio se discretiza en un número finito de volúmenes de control de tal manera que el flujo que sale de un volumen debe entrar en los volúmenes adyacentes a ése. De esta manera, al alcanzar el régimen estacionario, no puede haber pérdidas de flujo. Si los flujos que entran y salen de cada volumen no son iguales, esto quiere decir que las condiciones en cada volumen están cambiando y, en consecuencia, el flujo no es estacionario, en este caso hablamos de flujo transitorio.

El mismo esquema conceptual puede aplicarse, por ejemplo, a la energía. Entre las ventajas de este método destacan la facilidad para extender su formulación de casos bidimensionales a tridimensionales y la posibilidad de emplear mallas no regulares (no estructuradas), lo que hace el método muy adecuado para problemas con geometrías complicadas.

El procedimiento consiste primeramente en discretizar el dominio espacial en volúmenes de control finitos mediante la creación de una malla. Luego, las ecuaciones que gobiernan son integradas sobre cada volumen de control, tal que la cantidad relevante (masa, cantidad de movimiento, energía etc.) está conservada en un sentido discreto para cada volumen de control.

La figura 2.8 muestra una malla típica con profundidad unitaria (de modo que es bi-dimensional), en la cual una superficie del volumen finito está representada por el área sombreada.

Cada nodo está rodeado por un grupo de superficies que abarcan el volumen finito. Todas las variables de la solución y características del fluido se almacenan en los nodos del elemento.

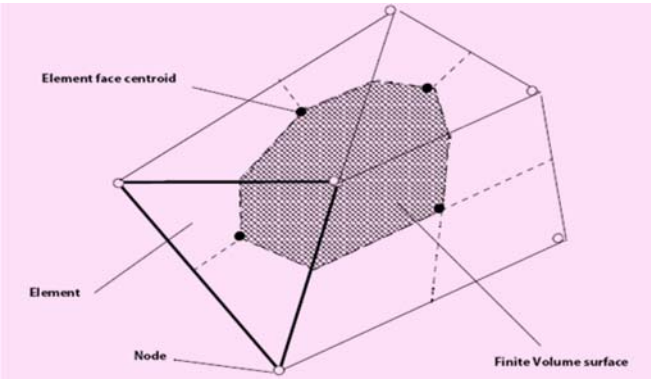

Figura 2.8. Superficie del volumen de control. [9]

Para obtener las ecuaciones discretizadas, se parte de las ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.16 que representan la forma promedio de las ecuaciones de la conservación para la masa, de cantidad de movimiento y un escalar pasivo, expresado en coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \qquad \textbf{Ec. (2.14)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j U_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu_{eff}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right) + \rho \overline{\mathbf{g}} \qquad \textbf{Ec. (2.15)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_{eff}\left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j}\right)\right) + S_\phi \qquad \textbf{Ec. (2.16)}$$

Al integrar estas ecuaciones sobre un volumen de control y aplicar el Teorema de divergencia de Gauss, se convierten las integrales de volumen a integrales de

superficie. Para los volúmenes de control que no se deforman en el tiempo, las derivadas de tiempo se pueden mover fuera de las integrales de volumen, con lo que se obtienen las ecuaciones 2.17, 2.18 y 2.19.

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho dV + \int_S \rho U_j \, dn_j = 0 \qquad \textbf{Ec. (2.17)}$$

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho dU_i + \int_S \rho U_j \, U_i dn_j = -\int_S P dn_j + \int_S \mu_{eff}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) dn_j + \int_V S_U \, dV \qquad \textbf{Ec. (2.18)}$$

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho\phi dV + \int_S \rho U_j \phi \, dn_j = \int_S \Gamma_{eff}\left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j}\right) dn_j + \int_V S_\phi \, dV \qquad \textbf{Ec. (2.19)}$$

Donde, V y S denotan respectivamente volumen y superficie de las regiones de integración, y dn_j son componentes cartesianas de los diferenciales del vector normal a la superficie exterior, μ_{eff} es viscosidad efectiva ($\mu + \mu_t$), μ es la viscosidad Molecular o dinámica, μ_t es la viscosidad turbulenta, Γ_{eff} es la difusividad efectiva y la variable escalar general. Las integrales de superficie son las integrales de los flujos, mientras que las integrales de volumen representan fuente o término de acumulación.

El primer paso para solucionar estas ecuaciones numéricamente continuas es aproximarlas usando funciones discretas. Considere un elemento aislado del mallado tal como se muestra a continuación en la figura 2.9. Los flujos superficiales pueden ser discretamente representados en los puntos de integración para terminar la conversión de la ecuación continua a su forma discreta. Los puntos de integración, ipn, están situados en el centro de cada segmento superficial en un elemento 3D que rodea el volumen finito.

La forma discreta de las ecuaciones integrales de la ecuación de la continuidad, cantidad de movimiento y variable adicional, están representadas por las ecuaciones 2.20, 2.21 y 2.22, respectivamente.

$$V\left(\frac{\rho - \rho^{\circ}}{\Delta t}\right) + \sum_{ip}\left(\rho U_j \Delta n_j\right)_{ip} = 0 \qquad \textbf{Ec. (2.20)}$$

$$V\left(\frac{\rho U_i - \rho^{\circ} U_i^{\circ}}{\Delta t}\right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip}(U_i)_{ip} = \sum_{ip}(P\Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip}\left(\mu_{eff}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\Delta n_j\right)_{ip} + \overline{S_U}V \quad \text{Ec. (2.21)}$$

$$V\left(\frac{\rho\phi - \rho^{\circ}\phi^{\circ}}{\Delta t}\right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip}\,\phi_{ip} = \sum_{ip}\left(\Gamma_{eff}\frac{\partial \phi}{\partial x_j}\right)_{ip} + \overline{S_\phi}V \qquad \text{Ec. (2.22)}$$

Donde, V es el volumen de control, el subíndice *ip* denota un punto de integración, la adición excedente de todos los puntos de integración del volumen finito, Δn_j es la superficie exterior discreta del vector, Δt es el paso del tiempo. Los exponentes "***o***" se refieren al nivel del tiempo anterior. En las ecuaciones anteriores se utiliza el esquema hacia atrás de Euler de primer orden. El flujo másico discreto que atraviesa una superficie del volumen finito, se denota $\dot{m}_{ip}$ y está dado por:

$$\dot{m}_{ip} = (\rho U_j \Delta n_j)_{ip} \qquad \text{Ec. (2.23)}$$

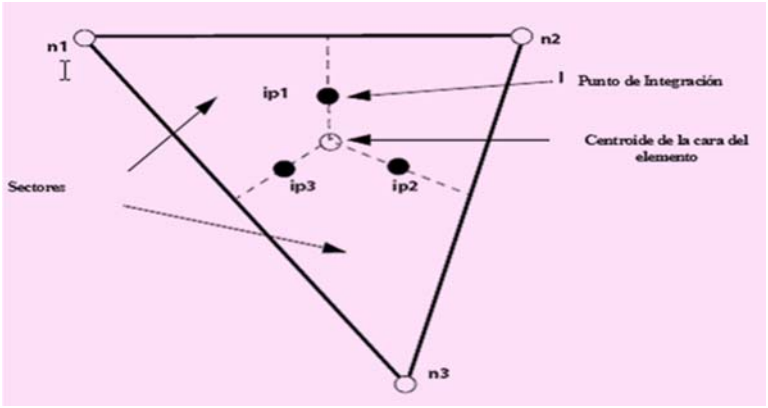

Figura 2.9. Elemento de la malla. [9]

2.4.7 Modelo de Turbulencia

El flujo turbulento se caracteriza por un movimiento complejo de remolinos, que produce fluctuaciones en las componentes de velocidad, presión, temperatura, entre otras. Son varios los modelos disponibles para abordar la turbulencia en simulaciones numéricas, y en simulaciones de flujos turbulentos con reacción química estos modelos son de gran utilidad. La elección del modelo de turbulencia

dependerá de las consideraciones que se realicen y de las condiciones físicas del fluido. Otros factores importantes serán la práctica que se adquiera en la resolución de un problema, la capacidad de cálculo computacional y el tiempo disponible para realizar la simulación.

Un modelo de turbulencia es un procedimiento numérico que permite relacionar los valores medios de las fluctuaciones de las variables con los valores promedio (en la nomenclatura propia de estos métodos, se habla de cerrar el sistema de ecuaciones), de forma que se puedan resolver las ecuaciones de gobierno. Un modelo de turbulencia será útil, dentro de un programa CFD de propósito general, si es exacto, sencillo y económico computacionalmente. Entre los modelos se encuentra los modelos ***k-ε***, los modelos de grandes vértices (LES o Large Eddy Simulation) y el BSL de esfuerzos de Reynolds, entre otros [5].

2.4.7.1 Modelo de dos Ecuaciones *k-ε*

Este modelo pertenece al grupo de modelos de turbulencia a dos ecuaciones. Ha sido extensamente utilizado debido a que ofrece un equilibrio entre esfuerzo numérico y precisión computacional. En este modelo dos ecuaciones diferenciales son utilizadas para calcular el transporte de dos propiedades turbulentas, de manera similar al cálculo de transporte de energía o cantidad de movimiento lineal en el fluido. Estas dos ecuaciones diferenciales, una ecuación cinética k y una ecuación de disipación de la turbulencia ε, son adicionadas al grupo de ecuaciones de conservación, y resueltas de forma acoplada [13].

Es el más simple de los modelos completos de turbulencia. Es un modelo donde la solución de dos ecuaciones de transporte separados lleva a determinar independientemente la velocidad turbulenta y las longitudes de escala. Es robusto, económico, de razonable aproximación para un rango muy amplio de flujos

turbulentos. Es por este motivo que tiene gran popularidad en flujos industriales y simulaciones de transferencia de calor.

2.4.8 Criterio de convergencia

En cualquier etapa del cálculo, cada ecuación del sistema lineal de las ecuaciones discretizadas (ver ecuación 2.24) no será resuelta exactamente. Por esta razón, se utiliza un parámetro para medir la aproximación de la solución en cada etapa a la solución real. Este término es conocido como residuo (r). El residuo se obtiene resolviendo la ecuación 2.25. En la ecuación 2.24, [A] es la matriz de coeficientes, [φ] es el vector solución y [b] es el lado derecho del sistema de ecuaciones [8].

$$[A][\phi] = [b] \qquad \text{Ec.(2.24)}$$

$$r = b - A\phi \qquad \text{Ec.(2.25)}$$

El residuo (r) de una ecuación permite identificar que tanto el lado izquierdo de la ecuación difiere del lado derecho en cualquier punto del espacio. Si la solución es exacta entonces el residual es cero. Exacto significa que cada una de las ecuaciones relevantes de los volúmenes finitos están precisamente satisfechas. A pesar de esto, como estas ecuaciones permiten modelar la física de una manera aproximada, esto no significa que la solución exacta coincida con lo que ocurre en la realidad. Si la solución esta convergiendo, los residuos deberían disminuir sucesivamente con cada iteración.

Una medida de que tan bien la solución ha convergido se puede obtener graficando el residuo de cada ecuación al final de cada período de tiempo o iteración (timestep).

El aumento del residuo luego de una iteración particular no implica que la solución esta divergiendo. Usualmente residuales aumentan, especialmente al comienzo de la corrida.

Para darle significado a las escalas de los residuos, el CFX solver normaliza los valores dividiendo la escala apropiada en cada punto. Los residuos normalizados son los graficados por el solver manager usando una escala de logaritmo base diez.

Es posible que la solución no cambie apreciablemente de una iteración a otra cuando no se ha llegado a la convergencia del residual.

Siempre se debe chequear que cuando la corrida para, sea porque se llego al criterio de convergencia o porque se llegó al número máximo de iteraciones. En el último caso la solución no ha convergido al nivel especificado.

2.4.8.1 Tipos de criterio de convergencia

Una solución numérica converge si los valores de las variables en los puntos en el dominio tienden a moverse hacia algún valor fijo conforme progresa la solución. ANSYS CFX calcula residuos normalizados para juzgar la convergencia de los problemas simulados. La tasa de convergencia está definida a través de la ecuación (3.26), en donde R_n es el residual de la iteración n y R_{n-1} es el residual de la iteración previa [8].

$$Rate = \frac{R_n}{R_{n-1}} \qquad \textbf{Ec. (3.26)}$$

El software permite seleccionar el criterio de parada de la solución entre dos normas disponibles para el cálculo de los residuos.

La norma “Raíz del Promedio de los Cuadrados” (RMS por sus siglas en inglés), la cual eleva al cuadrado el residual normalizado en cada volumen de control del dominio, luego suma esos cuadrados, los promedia y finalmente saca la raíz cuadrada a este valor:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(r)^2} \qquad \textbf{Ec. (3.27)}$$

Donde *n* es el número de volúmenes de control en el dominio y *r* es el residual en cada uno de esos volúmenes. La segunda norma conocida como MAX establece que el valor del residual es igual al valor absoluto del máximo residuo en todo el dominio:

$$MAX = \max|r| \qquad \text{Ec. (3.28)}$$

En esta investigación se considera como criterio de convergencia la norma RMS con un nivel de convergencia o límite de residual de $1x10^{-4}$. Este nivel es recomendado por el software y considerado bueno para convergencias en simulaciones.

CAPITULO III

3.1 UNIDAD DE COMBUSTIÓN CONTINUA

3.1.1 Funcionamiento de la Unidad de Combustión Continua

La unidad consiste en un recipiente cilíndrico de acero inoxidable al cual se aspira aire continuamente por medio de un soplante centrífugo, La combustión se lleva a cabo en el quemador al mezclarse el aire y el combustible, los cuales llegan a este por circuitos independientes, el quemador posee un conducto por donde llega el propano directamente desde su recipiente de almacenamiento. La unidad utiliza el mecanismo de quemar directamente el combustible con la propia corriente de aire. El efecto torbellino de los flujos se genera por medio del conducto de aire a la entrada del quemador, este efecto proporciona un mayor grado de mezcla entre los dos fluidos.

La cámara posee un sistema de refrigeración por agua para evitar elevadas temperaturas las cuales son peligrosas para las paredes internas del recipiente cilíndrico de la unidad. Los caudales de aire, combustible y agua de enfriamiento se gradúan gracias a los mandos manuales permitiendo así, obtener para el análisis experimental varias relaciones aire/combustible. Al ser la combustión continua, sólo se requiere de una chispa eléctrica para iniciar el proceso, la ignición se produce por medio de la bujía de encendido la cual trabaja con corriente alterna, después de lo cual la combustión se automantiene. El recipiente cilíndrico también consta con mirillas de diferentes diámetros en la que puede observarse la envolvente de la llama. Los gases producto de la combustión dejan la cámara a elevada temperatura por medio del tubo de escape ubicado en la parte posterior del equipo.

3.1.2 Características del Equipo

La Unidad de Combustión Continua está proyectada no sólo para investigar la combustión y la tecnología de los combustibles, sino también para demostrar el manejo y el funcionamiento de equipos típicos de combustión industriales.

Un quemador de líquido o gas, de media presión, funciona en la cámara de combustión de acero inoxidable, refrigerada por agua, provista de mirillas de vidrio y puntos de toma de datos.

Los instrumentos y mandos incorporados permiten una amplia gama de relaciones aire/combustible y de regímenes de combustión, así como determinar el balance de calor completo. El equipo estándar funciona con combustibles gaseosos y destilados líquidos.

El quemador y la cámara de combustión son estancos al aire, para que el consumo de aire medido en la placa de orificio sea la cantidad total usada en el proceso de combustión. Esto permite elegir relaciones exactas de aire/combustible, obteniéndose los resultados que servirán para comparar con los resultados de la simulación.

El análisis de los gases de escape puede realizarse a partir de cualquier punto dentro de la zona de combustión. Midiendo exactamente el calor absorbido por el agua de refrigeración y la temperatura de los gases de escape, puede obtenerse un cuadro claro de los efectos de las principales variables que contribuyen al empleo eficiente del combustible.

La unidad de combustión continua servirá para realizar una verificación práctica del análisis numérico realizado en la simulación, para una comprensión completa del proceso de combustión.

3.1.3 Componentes del Equipo

3.1.3.1 Componentes de la sección electromecánica:

El sistema electromecánico está comprendido por:

- Sistema de refrigeración.
- Sistema de combustión.
- Sistema de encendido.
- Motor eléctrico.
- Soplador centrífugo.

3.1.3.2 Componentes de la sección de instrumentación y control:

La sección de instrumentación y control está formada por:

- Indicadores de temperatura (termómetro de aguja, cuatro en total).
- Tres (3) válvulas controladoras de caudal.
- Válvulas reguladoras de presión (aire y gas).
- Dos (2) manómetros diferenciales.

3.1.4 Partes del Equipo

El equipo consta de las siguientes partes (ver figura 3.1):

1. Entrada de refrigerante (H_2O).
2. Indicador de temperatura entrada de agua.
3. Válvula controladora del flujo másico de agua.
4. Válvula de prueba de refrigerante.
5. Rotámetro para medir flujo másico de agua.
6. Indicador de temperatura a la salida del agua de la cámara.
7. Indicador de temperatura de los gases de escape.
8. Indicador de temperatura del aire a la entrada de la cámara.
9. Motor eléctrico (acoplado al soplador).
10. Válvula controladora del flujo másico del combustible gaseoso.

11. Manómetro indicador del flujo másico de aire.
12. Manómetro indicador de presión a la entrada del combustible.
13. Rotámetro para medir flujo másico de combustible gaseoso.
14. Perillas ajustadoras de manómetros.
15. Botón de encendido.
16. Rotámetro para medir flujo másico de combustible líquido.
17. Válvula controladora de flujo másico de combustible líquido.
18. Entrada combustible líquido.
19. Entrada combustible gaseoso.
20. Válvula reguladora para la presión del gas.
21. Válvula reguladora para la presión de entrada de aire a la cámara.
22. Pin palanca reguladora del caudal másico de aire.
23. Bujía de encendido.

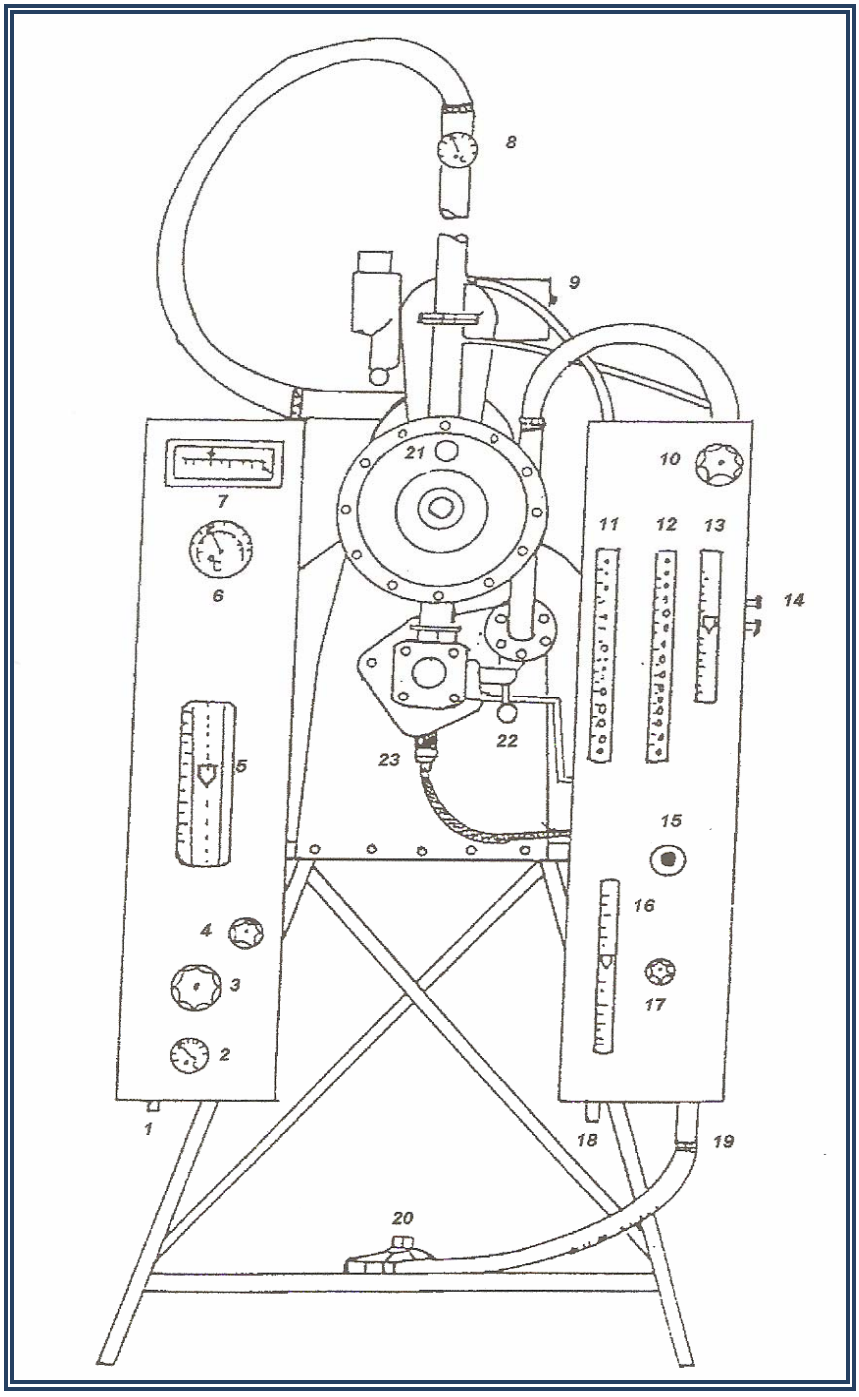

Figura 3.1 Unidad de Combustión Continua. [3]

3.1.5 Especificaciones Técnicas del Equipo

- **Quemador**

Quemador combinado Shieldrop No. 3, con surtidores y conducto para combustibles destilados y gases.

- **Suministro de Aire**

Soplante centrifugo B.V.C Tipo Y3/100 de tres etapas, con salida a través de una tubería de 50 mm a un regulador, que mantiene una presión de unos 250 mm de columna de agua en el quemador.

- **Cámara de Observación**

Tubo de acero inoxidable de doble envuelta, con diámetro interior de 46 cm, 91 cm de largo y pared de agua de 25 mm en el cilindro con 38 mm en la placa terminal. Cuatro orificios de observación o toma de muestras de 50 mm y uno de 140 mm de diámetro y un punto de toma de 25 mm de diámetro para toma de muestras.

- **Mandos**

Mandos manuales para aire y combustible, que permiten una amplia variedad de relaciones aire/combustible con regímenes de combustión de relación hasta 5:1.

Válvula de medida de combustible líquido.

Válvula de medida de combustible gaseoso.

Válvula de mando de caudal de agua de enfriamiento de la cámara principal.

Válvula de mando del agua de enfriamiento de la toma de muestras.

- **Suministro Eléctrico**

Pueden servirse el suministro de aire y el encendido para funcionar con corriente de 220/1/50 ó 110/1/60.

- **Medidor de Aire**

Placa de orificios y manómetro diferencial con escalas de lectura directa calibradas 0-160 kg/h.

- **Medidor de Combustible**

Contadores de tubo de vidrio con escalas de lectura directa. (Líquido 0-13kg/h), (Gas 0-19 kg/h). Manómetro para medida de la presión del gas a la salida de la válvula reductora de gas.

- **Medidor de Agua**

Contador de tubo de vidrio con escala de lectura directa de 0-1600kg/h.

- **Medidor de Temperaturas**

Termómetros de agua a la entrada del dispositivo. A la salida de la placa terminal (temperatura final), termopar de salida de gas para la chimenea 0-1000ºC con dispositivo para pirómetro de succión. Termómetro de aire de entrada en la tubería de salida del Soplante.

- **Toma muestras para análisis de gas**

Un toma muestras enfriado por agua puede tomar muestras de gas en numerosas posiciones dentro de la cámara. Válvulas de relé y de solenoide de detector de llama ultravioleta en las tuberías de combustible líquido y gaseoso.

3.1.6 Pruebas Experimentales

El ensayo experimental se llevó a cabo en la unidad de combustión continua Hilton, ubicada en el laboratorio de Termodinámica del Departamento de Mecánica de la Universidad de Oriente. Estas pruebas se realizan con la finalidad de evaluar el comportamiento de los parámetros del proceso de combustión propano-aire para así obtener los resultados que permitirán corroborar el estudio a través de la simulación y cumplir con los objetivos planteados en la investigación. Para ello se efectuaron siete (7) pruebas experimentales para un flujo másico constante de combustible y agua de enfriamiento. El parámetro a variar en el proceso fue el flujo másico de aire, buscando obtener varias relaciones aire/combustible. La temperatura de los gases de escape y la temperatura del agua a la salida de la cámara se midieron para cada prueba.

Las condiciones de las pruebas experimentales se presentan a continuación:

- Combustible = Propano comercial.
- Presión de entrada del gas = 13 cm de columna de agua (13×10^{-3} kg/cm^2).
- Flujo másico de gas = 8,5 kg/hr.
- Flujo másico de aire = variable.
- Temperatura de entrada de aire = 27 °C.
- Flujo másico de agua = 650 kg/hr.
- Temperatura de entrada de agua = 24 °C.

3.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO

El presente trabajo de investigación se basa en la simulación numérica del proceso de combustión propano-aire generado en la cámara de combustión continua experimental Hilton, mediante el método de los volúmenes finitos por medio de un software comercial especializado en simulación de fluidos (ANSYS CFX 11.0^{TM}).

El modelo físico consiste en una unidad de combustión continua, dibujada mediante el software comercial de diseño SolidWorks 2006^{TM}. SolidWorks es un programa de diseño asistido por computador para modelado mecánico que corre bajo el sistema operativo Microsoft Windows. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. Mediante SolidWorks pueden crearse modelos de piezas, equipos, ensamblajes y dibujos.

Esta geometría representa el volumen interno de la cámara de combustión desde que entra los flujos de aire y propano hasta la salida de los gases de escape. Cabe destacar que la construcción de este modelo se realiza partiendo de medidas tomadas directamente a la unidad de combustión y medidas obtenidas del manual de especificaciones técnicas del equipo.

En la figura 3.2 se presenta las dimensiones de la cámara de combustión continua, dibujada mediante el software comercial de diseño SolidWorks 2006^{TM}.

En la figura 3.3 se presenta una vista global de la geometría del dominio computacional, donde se aprecia en forma clara el quemador, enfocando con detalle las entradas de aire y de combustible para que se realice la mezcla, utilizando el software comercial de diseño SolidWorks 2006^{TM}. En la figura 3.4 se presenta una vista seccionada a través del plano medio de la cámara de combustión, para enfocar la sección interior del modelo físico, el punto de mezcla de los flujos, así como la salida de los gases de escape, dibujada mediante el software SolidWorks 2006^{TM}.

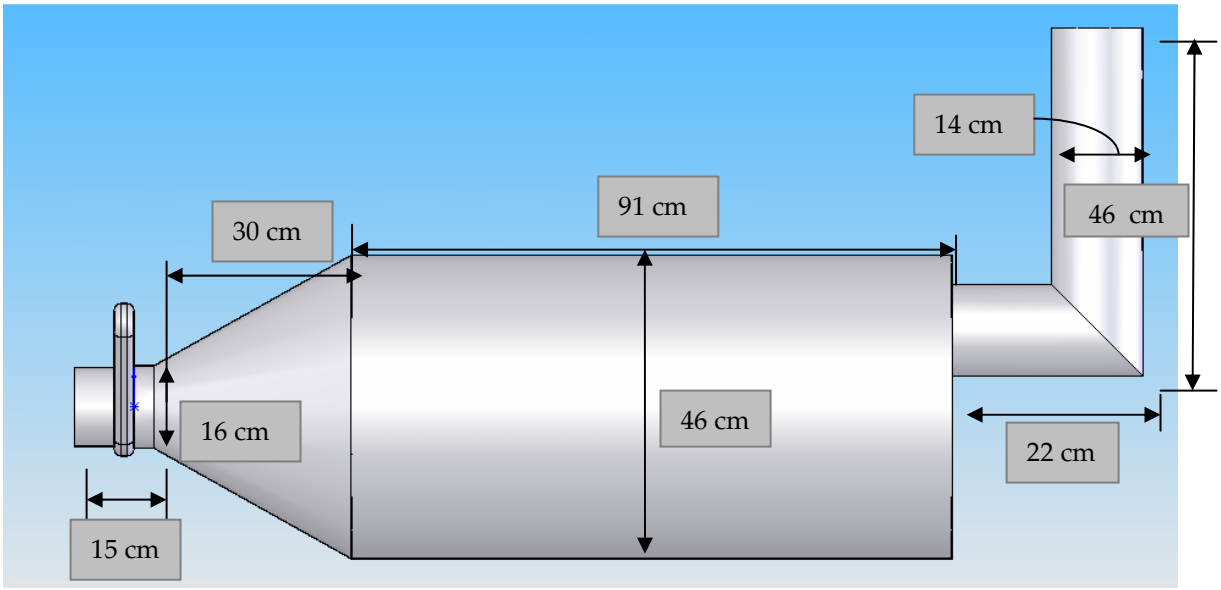

Figura 3.2 Dimensiones de la cámara de combustión.[Fuente propia]

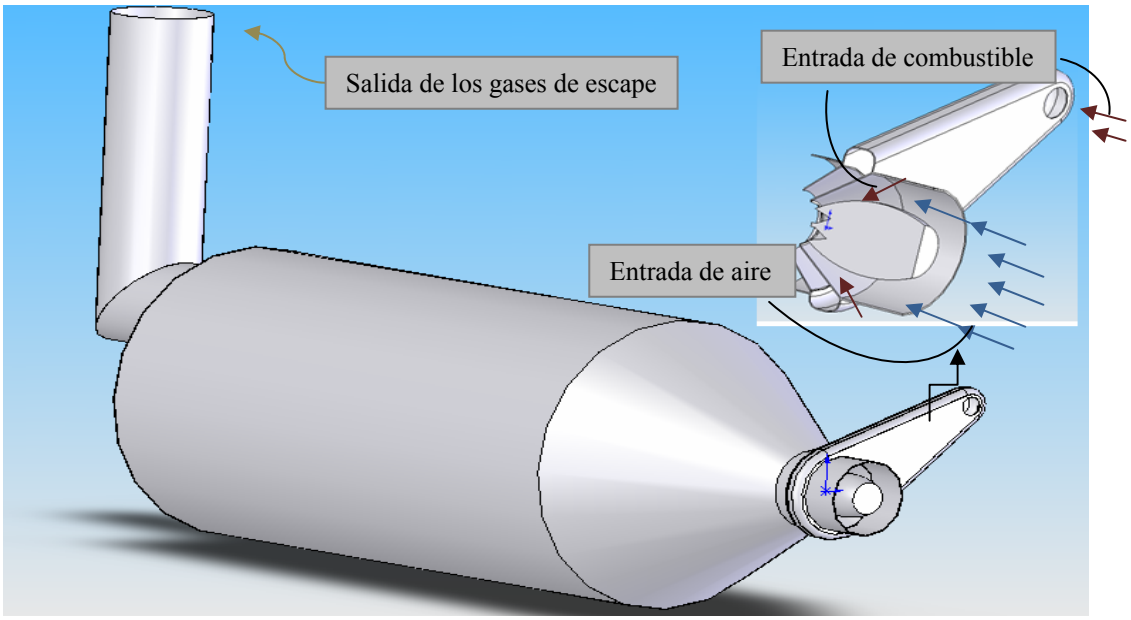

Figura 3.3 Vista global del dominio físico de la unidad de combustión.[Fuente propia]

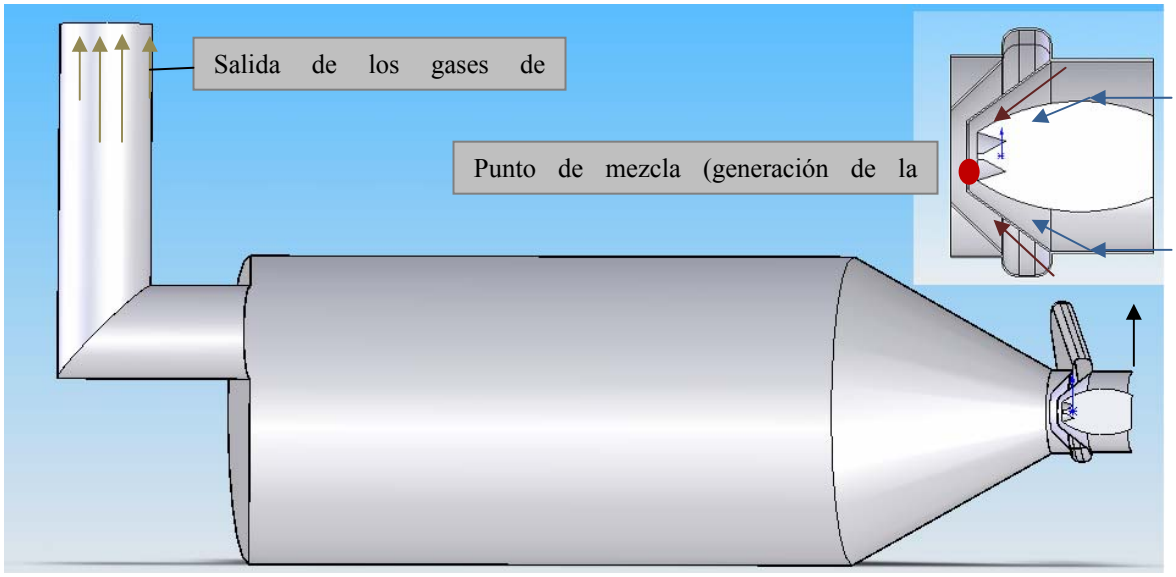

Figura 3.4 Vista seccionada a través del plano medio del dominio físico de la unidad de combustión. [Fuente propia]

3.3 DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO FÍSICO

3.3.1 Generación del Mallado

Las técnicas numéricas para la generación de un mallado sobre el que resolver las ecuaciones de gobierno se definen como procedimientos para la distribución ordenada de pequeños volúmenes geométricos o estaciones de tomas de datos en un dominio físico, de forma que exista la mejor comunicación posible entre las distintas estaciones y que los distintos fenómenos físicos que ocurran en dicho dominio físico continuo estén representados con la suficiente exactitud por medio de estos volúmenes geométricos (discretización espacial).

La generación del mallado se llevó a cabo mediante el software ANSYS WORKBENCH 11.0, generando un tipo de discretización espacial denominada mallado no estructurado para resolver las ecuaciones que rigen el comportamiento del dominio físico en estudio. El mallado no estructurado brinda flexibilidad y adaptabilidad para manejar geometrías complicadas y la generación de la malla automática es mucho más fácil. Este criterio de discretización espacial generado para este estudio comprende los parámetros y condiciones establecidas a continuación:

- **Espaciamiento del cuerpo** - **Máximo espaciamiento** → 10 mm.
- **Espaciamiento de cara** → Espaciamiento de volumen.

Esta técnica permite distribuir los elementos a través de todo el dominio de la forma más regular posible, con variaciones suaves de densidad, logrando así obtener una malla refinada en toda la geometría.

- **Escala global de mallado (GMS)** → 1.0

Este parámetro permite controlar el tamaño de los elementos en el mallado para generar los mismos de forma más conveniente para el estudio.

- **Estrategia de mallado** → Avance frontal.

Para la estrategia de mallado se empleó la técnica de Avance Frontal 3D (advancing Front 3D), esta técnica permite la generación automática de mallas creando una superficie triangular en todo el dominio computacional mediante el método de Delaunay.

- **Mallado Superficial** → Método de Delaunay.

El método de Delaunay parte de una serie de puntos o nodos y los triángulos o tetraedros se construyen de forma que estos puntos son los correspondientes centros de masa.

- **Mallado Volumétrico** → Avance frontal.

Este parámetro permitió realizar una malla de volumen la cual contiene elementos tetraédricos, prismáticos y piramidales, con el objetivo de lograr ajustar estos pequeños volúmenes geométricos a las variaciones de las variables en la solución del flujo.

En las figuras 3.5 y 3.6 se aprecia la generación del mallado no estructurado para el dominio físico enfocando las zonas de entradas de los fluidos (propano y aire) y la zona de salida de los gases de escape respectivamente.

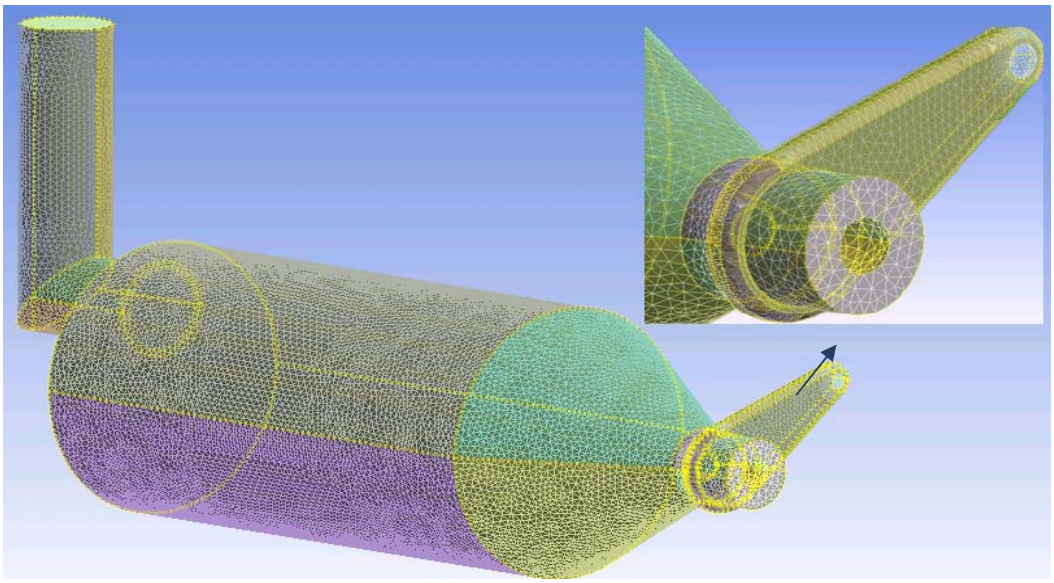

Figura 3.5 Mallado no estructurada para el dominio físico enfatizando las entradas de fluidos.[Fuente propia]

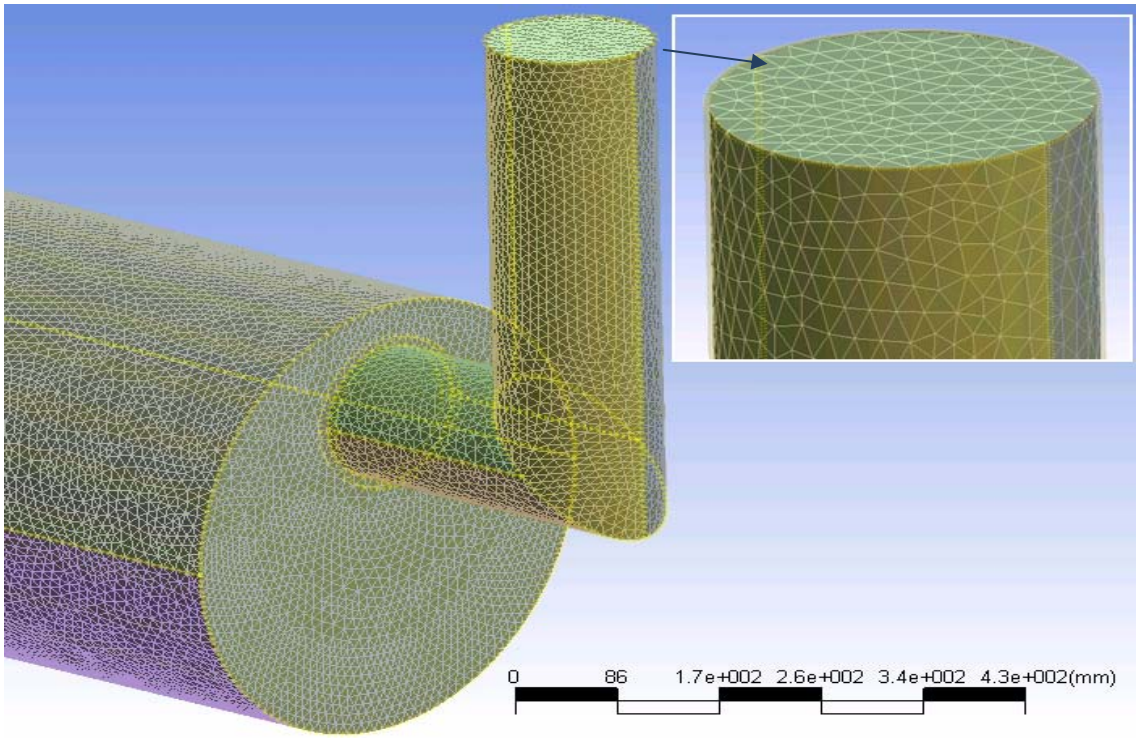

Figura 3.6 Mallado no estructurada para el dominio físico enfatizando la salida de gases de escape. [Fuente propia]

3.3.2 Ecuaciones de Conservación Utilizadas

El programa **ANSYS CFX 11.0** utiliza la metodología de volúmenes finitos, la cual aplica las ecuaciones de conservación en un espacio tridimensional discreto. Este espacio es llamado volumen de control. La metodología consiste en integrar y resolver el conjunto de ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento en las tres direcciones, propiedades turbulentas, especies químicas y energía, en cada volumen de control del dominio computacional de forma acoplada.

En este caso, el proceso de combustión se asume turbulento, y las ecuaciones tradicionales de Navier-Stokes reciben un tratamiento especial, es introducido el concepto de propiedad media, el cual contempla los conceptos de propiedad instantánea y de fluctuación. Por ejemplo, la velocidad del fluido en un punto está formada por la velocidad media, U y la fluctuación entorno de esa media, u.

Las ecuaciones de transporte utilizadas para modelar el problema son las ecuaciones de Navier-Stokes promedio de Reynolds (RANS). Estas ecuaciones resultan de la modificación de las ecuaciones convencionales de Navier-Stokes, mediante la introducción de cantidades promedios y fluctuantes de las variables para considerar la turbulencia.

La ecuación de la continuidad permanece igual sin alteración, pero las ecuaciones de momento, transporte de masa y energía si se alteran, ya que se añaden términos adicionales de flujo turbulento al término de flujo difusivo molecular. Estos términos forman los esfuerzos de Reynolds y los flujos de Reynolds.

- **Ecuación de continuidad:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho U) = 0 \qquad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde, ϱ es la densidad de masa y U es el vector velocidad.

- **Ecuación de cantidad de movimiento:**

En la ecuación de Reynolds promedio de la ecuación del momento (Ec. 3.2) se añaden los términos de esfuerzos de Reynolds ($\rho\overline{u \otimes u}$).

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot t - \nabla \cdot \rho\overline{u \otimes u} + S_M \qquad \text{Ec. (3.2)}$$

Donde, u es la componente fluctuante de la velocidad, p es la parte hidrostática del tensor de presión y τ es el tensor de esfuerzos molecular, que es la parte del tensor de presión debido a los efectos viscosos. El tensor de esfuerzo derivado rigurosamente de la teoría cinética por Hirschfelder en 1964 esta expresado por la ecuación 3.3, en la cual se desprecia la viscosidad volumétrica, caso común para los gases [11].

$$\tau = \mu\left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3}\delta U\right) \qquad \text{Ec. (3.3)}$$

Donde, μ es la viscosidad dinámica, (∇U) es el gradiente de la velocidad, (□U)^T es la traspuesta del gradiente de velocidad y (δU) es la divergencia de la velocidad. El término (S_M) de la ecuación 3.2 representa la sumatoria de las fuerzas de cuerpo.

- **Ecuación de la conservación de la energía:**

A la ecuación de la energía se le añade el término de flujo turbulento de Reynolds ($\overline{\rho u h}$):

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho U h_{tot} + \overline{\rho u h} - \lambda \nabla T\right) = \frac{\partial P}{\partial t} \qquad \text{Ec. (3.4)}$$

Donde: h_{tot} es la entalpia total media definida por la ecuación 3.5, P es la presión, T es la temperatura y λ es el coeficiente de transferencia de calor.

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2}U^2 + \frac{1}{2}\overline{u^2} \qquad \text{Ec. (3.5)}$$

Donde, h es la entalpia estática, $\frac{1}{2}U^2$ es la energía cinética media y $\frac{1}{2}\overline{u^2}$ es la energía cinética turbulenta.

- **Ecuación de la conservación de especies químicas:**

La solución de las ecuaciones de especies químicas predice la fracción másica para cada especie, Y_i, esta ecuación de conservación viene dada por:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \qquad \text{Ec. (3.6)}$$

Donde R_i es el factor neto de formación de la especie i en la reacción química y S_i es el factor añadido por la adición de las fases dispersas. Una ecuación de este tipo se puede solucionar para N-1 especies, donde N es el número total especies químicas.

- **Difusión masa en flujos turbulentos:**

En la ecuación superior $\vec{J}_i$ es el flujo de difusión de la especie i, debido al gradiente de concentración. En los flujos turbulentos, la difusión de masa sigue la forma:

$$\vec{J}_i = \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{S_{Ct}}\right)\nabla Y_i \qquad \text{Ec. (3.7)}$$

Donde S_{Ct} es el número turbulento de Schmidt, μ_t es la viscosidad turbulenta y D_i es la difusividad turbulenta. Por defecto S_{Ct} es 0,7.

3.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA MALLA

El código CFX permite analizar la sensibilidad de la simulación ante diferentes parámetros de entrada con la finalidad de obtener los valores más significativos de las principales magnitudes en tiempos razonables de cálculo con el menor costo computacional.

El estudio de sensibilidad de malla permite seleccionar el mallado con el tamaño de elementos que proporcione una buena calidad en los resultados para menores niveles de tiempo.

En el proceso de validación del mallado se verifica la autonomía que muestran los resultados con su respectiva densidad de malla empleada, la densidad de un mallado se define como el número de puntos por unidad de superficie o volumen.

Principalmente se generan para el dominio físico mallados con diferentes densidades de elementos o volúmenes de control para realizar las simulaciones y obtener la solución de las ecuaciones que rigen la dinámica del proceso de combustión. A medida que decrece el espaciamiento entre los elementos se obtiene una mejor distribución de las variables que intervienen en la definición de los campos de velocidad, presión y temperatura. Un mallado con alta densidad de elementos o volúmenes de control muy pequeños garantiza una solución más estricta de las ecuaciones que rigen un fenómeno determinado. Considerando, que no siempre un tamaño de malla pequeño, para discretizar el dominio, significa que se pueda resolver el problema eficientemente, ya que a menor tamaño de malla, el esfuerzo computacional aumenta (tiempo de cómputo), presentándose frecuentemente divergencia en la solución numérica.

El software CFX 11.0 dispone de una herramienta para realizar este análisis de sensibilidad, denominado el factor de escala global de mallado o Global Mesh Scaling (GMS). Este factor es una propiedad de todo mallado, el cual se multiplica por todas las escalas de longitud especificadas en el mallado antes de ser realizado, por lo tanto, permite su refinación uniforme sin tener que modificar las características establecidas previamente. A este factor se le pueden dar valores entre 0.5 y 2.0, el cual al ser disminuido produce proporcionalmente una disminución de todas las medidas de longitud del mallado y por consiguiente se produce una mayor densidad de elementos.

A continuación se presenta la tabla que proporciona los números de elementos que posee el mallado para cada escala global de malla (GMS).

Tabla 3.1 Variación del número de elementos en función de la escala global de malla

Malla	GMS	Nº Elementos
1	0.5	2104191
2	0.625	1567437
3	0.75	1183535
4	0.875	893835
5	1	754277

Para la selección de un mallado que cumpla con los requisitos necesarios para obtener buena calidad de resultados se compara el porcentaje de error que presenta la variable de interés (para este caso la temperatura de los gases de escape) en una simulación con una densidad de malla específica, con respecto a los datos de temperatura de gases de escape obtenidos en las pruebas experimentales. La simulación adecuada será la que presente buenos resultados con el menor tiempo de cómputo posible, lo que indica un mallado con menores números de elementos o

volúmenes de control pero que garantizan resultados aceptables de las ecuaciones que gobiernan el proceso.

Para este fin se selecciona una línea de evaluación del error, llamada línea de registro del perfil, sobre la cual se lleva a cabo el análisis (Ver figuras 3.7 y 3.8). Esta línea se dibuja en el ducto de salida de los gases de escape, para obtener el perfil de temperaturas en esa zona, luego los datos de temperaturas extraídos por medio de esta línea se promedian para así obtener una temperatura de salida de gases de escape global, la cual se compara con la temperatura de salida de gases de escape experimental.

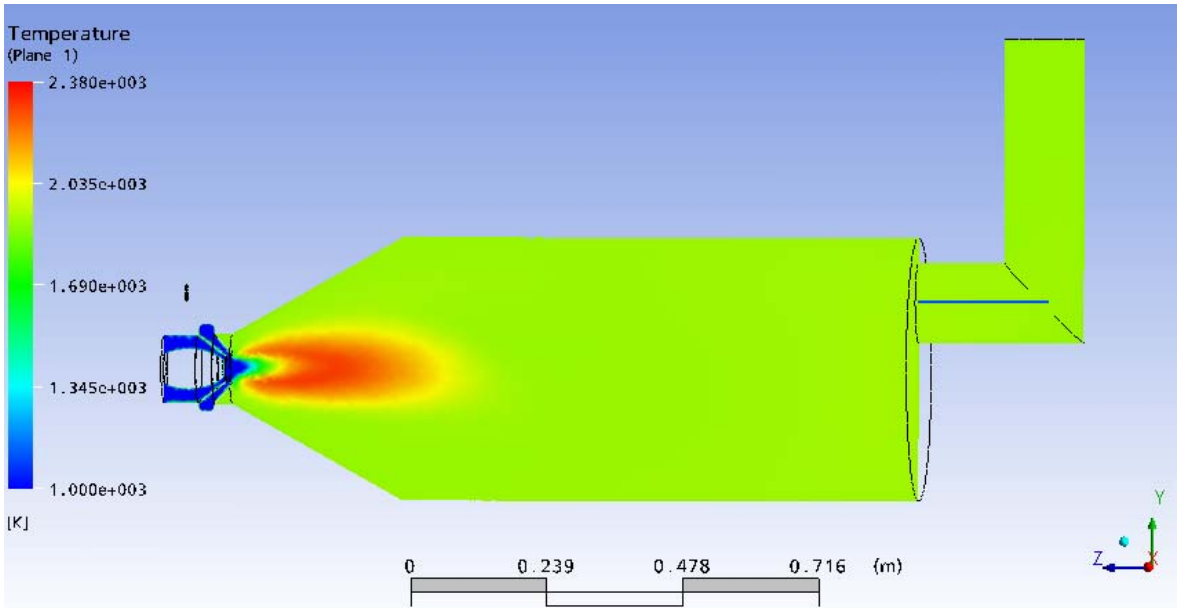

Figura 3.7 Línea de registro del perfil de temperatura en el ducto de salida de los gases.

[Fuente propia]

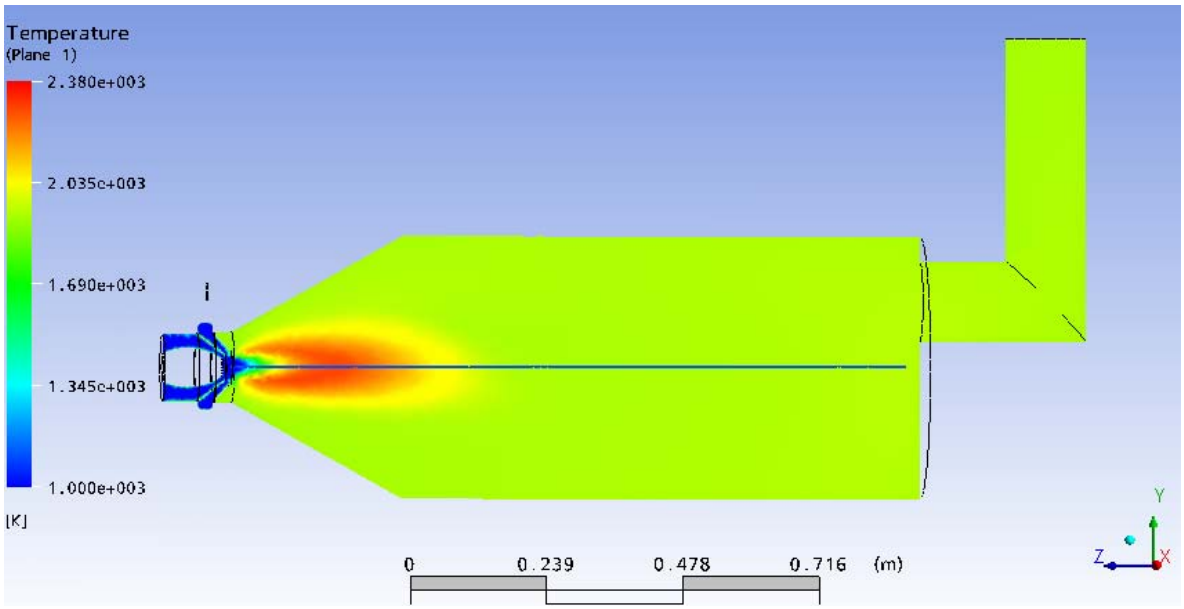

Figura 3.8 Línea de registro del perfil de temperatura en la cámara cilíndrica.[Fuente propia]

Los valores de temperatura obtenidos en todas las simulaciones se tomaron en los mismos puntos de la línea de registro de perfil para garantizar el cálculo del porcentaje de error en las mismas condiciones. Este proceso se repitió hasta obtener un perfil de temperatura aproximadamente constante para varias mallas, seleccionando el mallado de menor número de elementos pero que mejor se adapte a la solución del proceso brindando el menor costo computacional.

3.5 CONDICIONES DE BORDE EN EL MODELO COMPUTACIONAL

3.5.1 Modelo Computacional

Para analizar el proceso de combustión propano-aire, la combustión es modelada usando un mecanismo de reacción en un solo paso, asumiendo la conversión completa de combustible a CO_2 y H_2O. La reacción es:

$$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O \qquad \text{Ec.(3.8)}$$

La mayoría de combustibles se queman rápidamente, y la reacción se controla por la mezcla turbulenta. En muchos casos, se dice que la combustión ha de ser limitada por la mezcla. CFX proporciona una interacción del modelo químico-turbulento, basado en el trabajo de Magnussen y Hjertager, llamado **Eddy-Dissipation Model** [8].

3.5.2 Condiciones de Borde

Las condiciones de borde son especificaciones de las propiedades o condiciones en las superficies del dominio y son requeridas para definir totalmente la simulación de un flujo, en otras palabras se fijan las condiciones en los contornos del dominio y se busca la solución en su interior. Condiciones de contorno empleadas en el modelo computacional:

- **Condiciones del Dominio:**

El dominio computacional comprende toda la cámara de combustión donde se especificarán las entradas de los flujos de aire y combustible, las paredes de la cámara, y la salida de los gases de escape por el ducto posterior, con la finalidad de representar de la mejor forma posible mediante estas condiciones y parámetros la dinámica del proceso. La tabla 3.2 muestra los parámetros establecidos en el dominio computacional.

Tabla 3.2 Condiciones establecidas en el dominio computacional.

Tipo de Dominio	Dominio Fluido

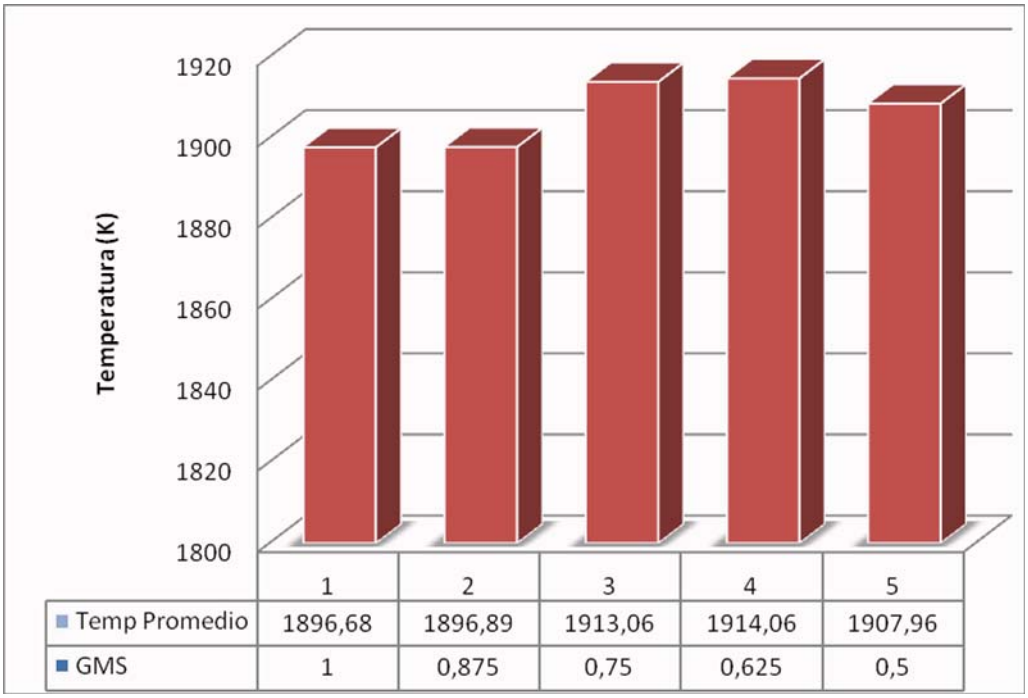

Figura 4.5 Temperatura promedio obtenidas en la zona de gases de escape para las diversas mallas simuladas.

Para las simulaciones en los diferentes mallados, la temperatura de los gases de escape promedio varía, a estas se le aplica el procedimiento para considerar el efecto del agua de enfriamiento y realizar la comparación con la temperatura experimental. En la tabla 4.3 se muestran los resultados de porcentaje de error calculados en los diversos mallados para la condición de simulación aire/combustible de 120/8,5:

Tabla 4.3 Porcentaje de error generado para las diversas mallas simuladas.

GMS	Temperatura Experimental (°C)	Temperatura Simulación (°C)	% Error
1	640	615.72	3.79
0.875	640	615.93	3.76
0.75	640	632.1	1.23
0.625	640	633.1	1.08
0.5	640	627	2.03

Debido a que los porcentajes de error son inferiores al 5% tomando en cuenta el análisis para esta condición de simulación, cualquier mallado podría brindar una solución aceptable del problema en estudio. En este caso, un factor importante a considerar es el costo computacional debido a que este incide directamente sobre el factor humano y las horas hombre trabajadas en las simulaciones. A medida que el valor de escala global de malla (GMS) disminuye se genera en el mallado una mayor densidad de elementos, esto afecta el tiempo de cálculo requerido por el computador, dado que necesita un mayor tiempo de computo para las solución de las ecuaciones que gobiernan el problema, por lo que es preciso encontrar un equilibrio entre el costo computacional y la definición de los campos de las variables. El factor de humano y la inversión de horas hombre es un parámetro importante en todo el proceso de simulación mediante técnicas de dinámica de fluidos computacional, lo que se quiere es llegar a una solución aceptable del problema en el menor tiempo de cálculo posible y con esto invertir un menor esfuerzo humano. A nivel industrial esto influye en lo que son los costos del personal, debido a que se requiere de técnicos calificados para la resolución de problemas mediante análisis computacional, por lo que es de vital importancia tomar en cuenta este factor a la hora de resolver flujos, procesos o sistemas mediante estos programas comerciales de simulación.

La tabla 4.4 muestra el efecto generado por la escala global de malla (GMS) sobre el tiempo de cálculo requerido por el computador, cabe destacar que las

simulaciones se trabajaron en un computador de mesa que posee las siguientes especificaciones: marca Lenovo, modelo 9842-A37, procesador Pentium Dual–Core de 2,00 GHz y 1 GB RAM.

Tabla 4.4 Efecto de la escala global de malla sobre el tiempo de cómputo

GMS	TIEMPO DE CÁLCULO
1	2 horas 45 minutos
0.875	3 horas 22 minutos
0.75	5 horas 14 minutos
0.625	9 horas 8 minutos
0.5	12 horas 37 minutos

Estudiando todos los factores de selección mencionados previamente, se seleccionó el mallado de escala global 0.75 con un número de elementos de (1183535) por brindar un excelente equilibrio y predecir de forma aceptable el comportamiento de los campos de velocidad, presión, temperatura y cantidad de las especies químicas.

Este proceso se repitió para cada una de las condiciones de simulación, donde se trabajaron varias relaciones aire/combustible y por lo tanto varias condiciones de flujo obteniendo para estas los siguientes resultados.

Tabla 4.5 Valores de escala global de malla seleccionados para las distintas condiciones de flujo

Condición de Flujos	Relación aire/combustible	GMS seleccionado
1	90/8,5	0.75
2	100/8,5	0.75
3	110/8,5	0.875

4	120/8,5	0.75
5	135/8,5	0.875
6	155/8,5	0.75

4.4 ANÁLISIS DE LOS PERFILES GENERADOS EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

4.4.1 Perfiles de Temperatura

Las figuras presentadas a continuación presentan los campos de temperatura obtenidos para las diversas simulaciones. En estas se observa características diferentes para cada relación aire/combustible, generándose contornos de llama específicos representados por la zona color rojiza, esto es producto de la variación de las condiciones de mezcla, donde a medida que se aumenta la relación A/C la forma de la llama va alagándose.

Las entradas de aire y combustible están representadas por la zona azul, esto es constante para todos los perfiles ya que los flujos entran a una temperatura ambiente. La temperatura de los gases producto de la combustión está representada por una coloración verde para las figuras 4.6; 4.7; 4.8 y por una coloración verde amarillenta para las figuras 4.9; 4.10; 4.11.

Es importante resaltar la zona donde entra en contacto el combustible con el comburente (zona de mezcla), aquí se forma un cono que se alarga a medida que se aumenta la relación A/C, lo que indica que la llama se desarrolla con mayor rapidez para el menor flujo de aire suministrado. Cabe destacar que para la relación A/C de 153/8.5 no parece generarse una buena combustión por lo tanto no se produce un quemado total del oxígeno del aire, debido a que se sobrepasa la cantidad de aire en exceso que debería inyectarse para realizar una buena combustión.

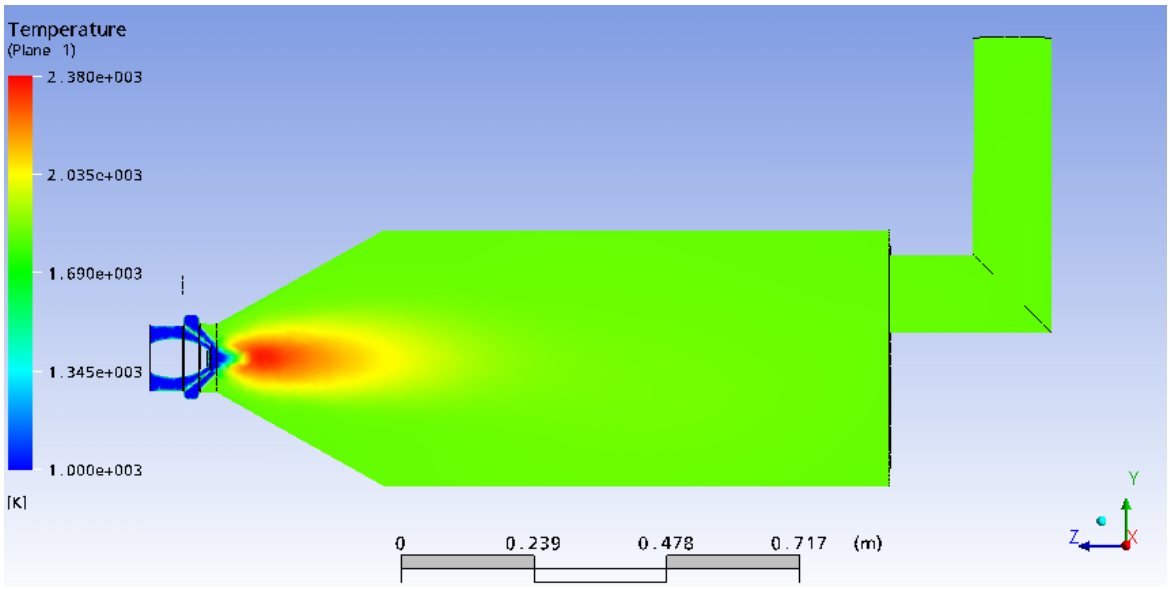

Figura 4.6 Perfil de Temperaturas para una relación A/C de 90/8.5

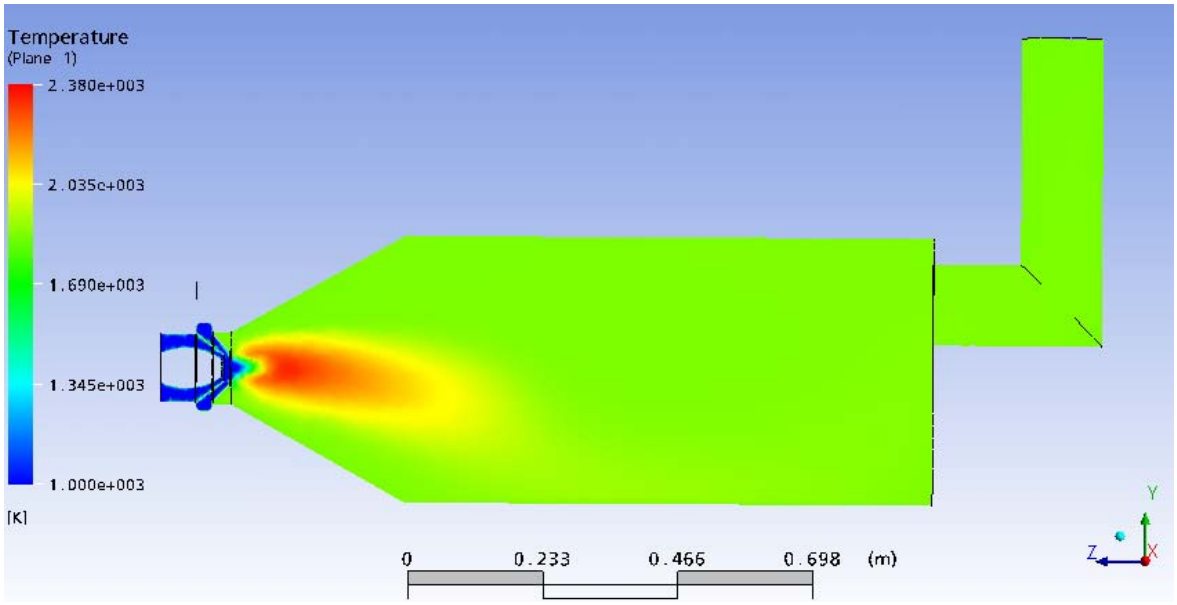

Figura 4.7 Perfil de Temperaturas para una relación A/C de 100/8.5

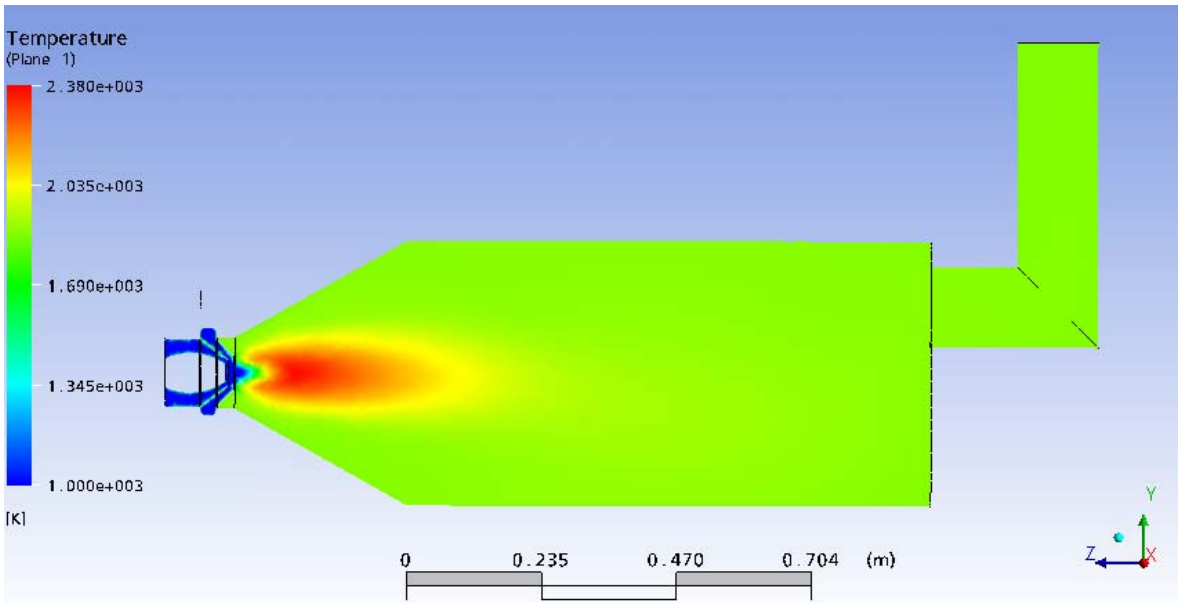

Figura 4.8 Perfil de temperaturas para una relación A/C de 110/8.5

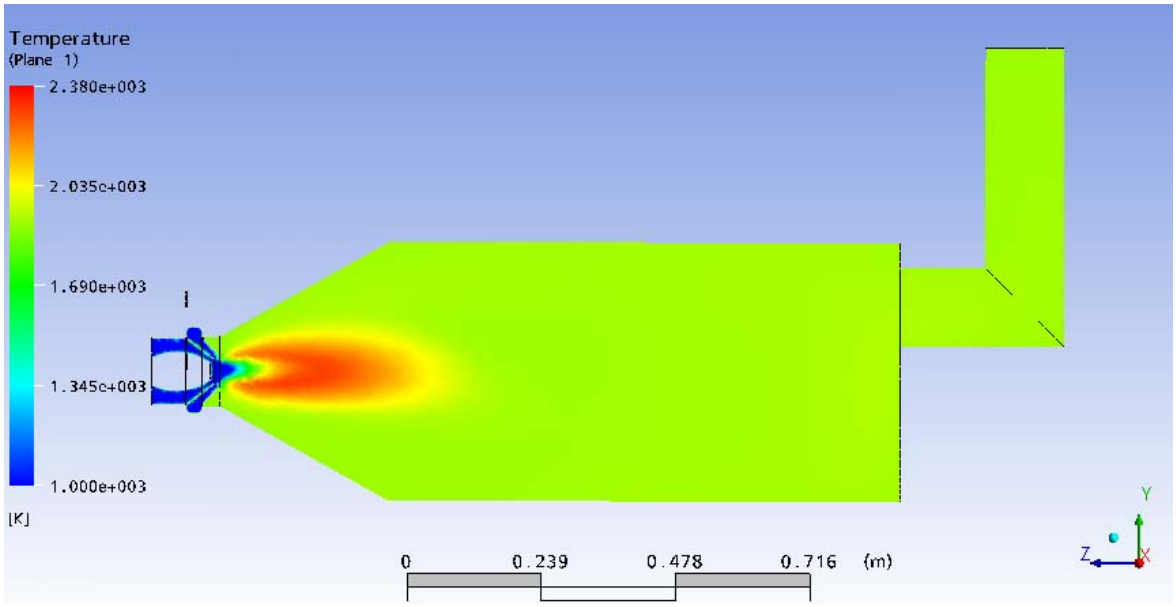

Figura 4.9 Perfil de temperaturas para una relación A/C de 120/8.5

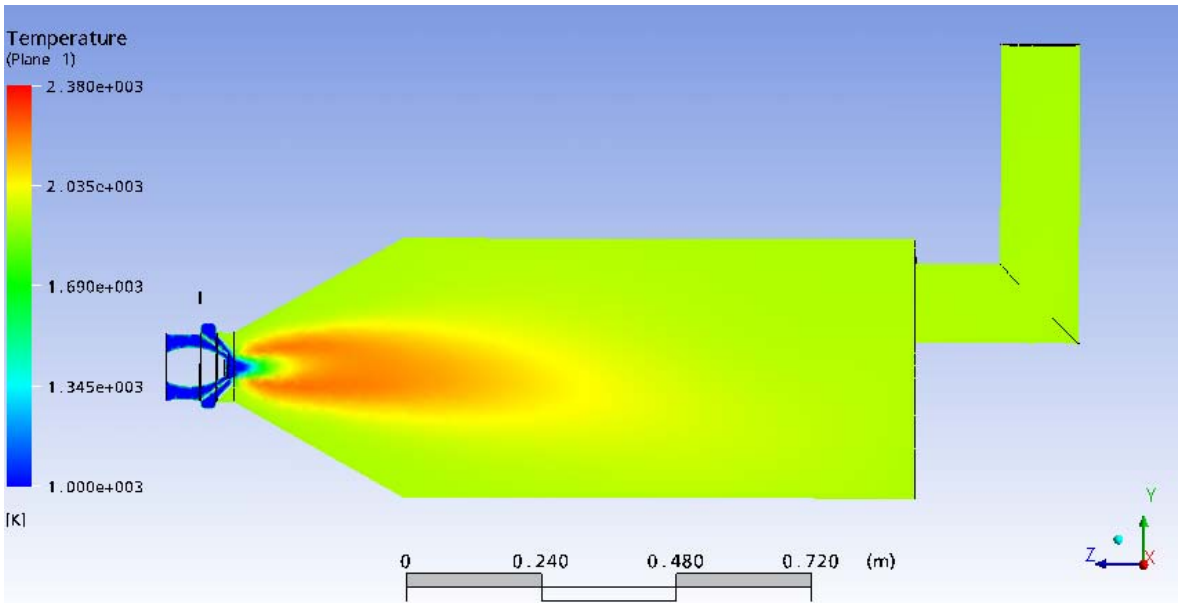

Figura 4.10 Perfil de temperaturas para una relación A/C de 135/8.5

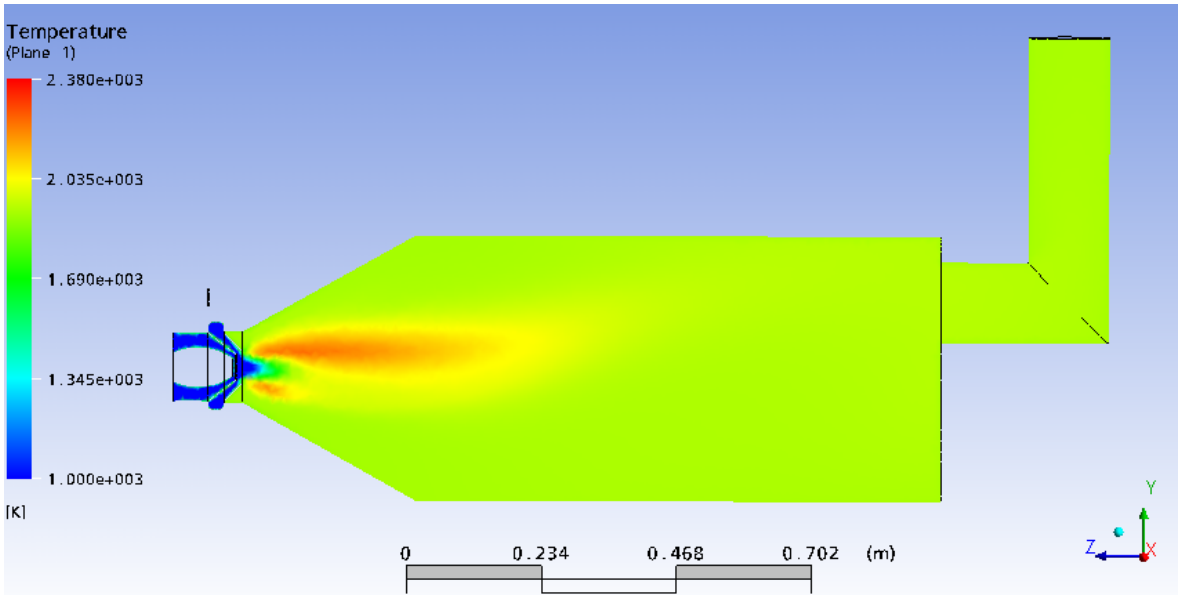

Figura 4.11 Perfil de temperaturas para una relación A/C de 153/8.5

4.4.2 Efecto de la relación A/C sobre la temperatura de gases de escape

El efecto de la relación aire/combustible sobre la temperatura que alcanzan los gases de combustión se muestran en la figura 4.12. Cabe destacar que las temperaturas presentadas en la grafica no están corregidas por el efecto del agua de enfriamiento.

A medida que se suministra una mayor cantidad de aire al proceso de combustión las temperaturas de los gases de escape aumenta debido a que la llama alcanza temperaturas más elevadas que afectan directamente la temperatura de los gases de combustión. El valor tope de temperatura alcanzado en la gráfica se da para la relación aire/combustible de 135/8,5 (valor en la gráfica 15,9), lo que indica que esta relación está muy cerca de la relación aire/combustible estequiométrica. Para la relación A/C de 153/8,5 (valor en la gráfica 18) la temperatura de los gases disminuye lo que indica que no se produce una buena combustión y esto afecta directamente en la temperatura de los gases. Se cree que de seguir aumentando el flujo de aire suministrado al proceso el proceso de combustión sería defectuoso por lo que los gases continuarían disminuyendo su temperatura, en líneas generales, este comportamiento era el esperado y coincide con el comportamiento experimental.

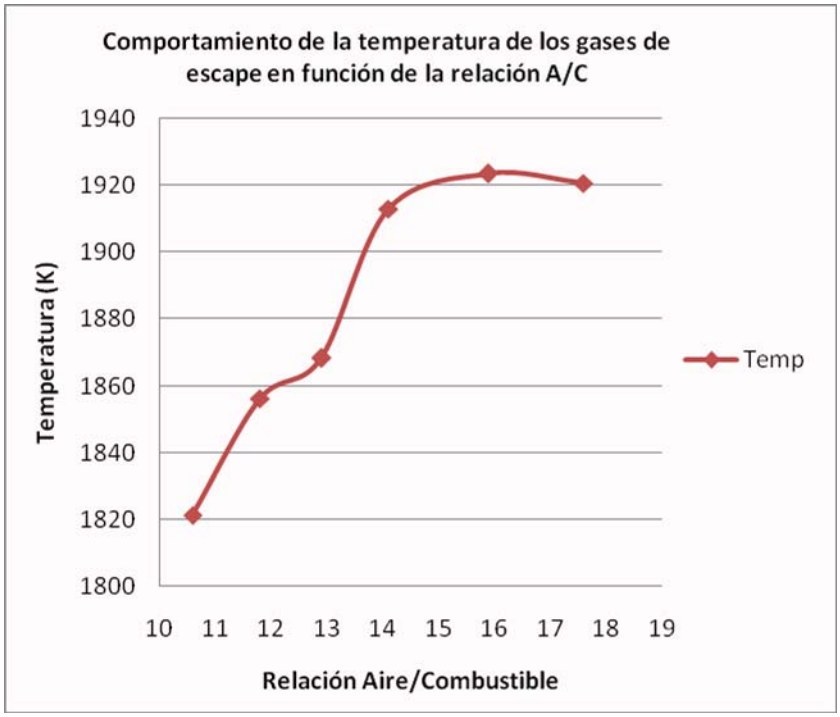

Figura 4.12 Efecto de la relación A/C sobre la temperatura de gases de escape

4.4.3 Perfiles de Velocidad

Los campos de velocidad generados para las diversas relaciones aire/combustible se muestran en las figuras a continuación. Primeramente se observa en la zona de entrada de aire como la velocidad de este flujo aumenta a medida que se aproxima a la zona de mezcla (zona verde clara en la entrada de flujo de aire), debido al efecto convergente de la tobera que forma parte de la configuración del quemador. En la zona de entrada a la cámara cilíndrica se alcanzan las mayores velocidades, cabe destacar que a medida que se inyecta un mayor flujo de aire las velocidades dentro de la cámara aumentan. Esto es importante resaltarlo debido a que conforme aumenta la relación aire/combustible, se alcanzan mayores temperaturas en la cámara, esto aumenta la densidad de los gases y se produce una expansión que propicia un aumento en la velocidad de los gases en la cámara. En la zona de salida de los gases de escape se aprecia como aumenta la velocidad del flujo (coloración verde clara)

producto de la reducción del área, posteriormente, los gases alcanzan la zona de descarga.

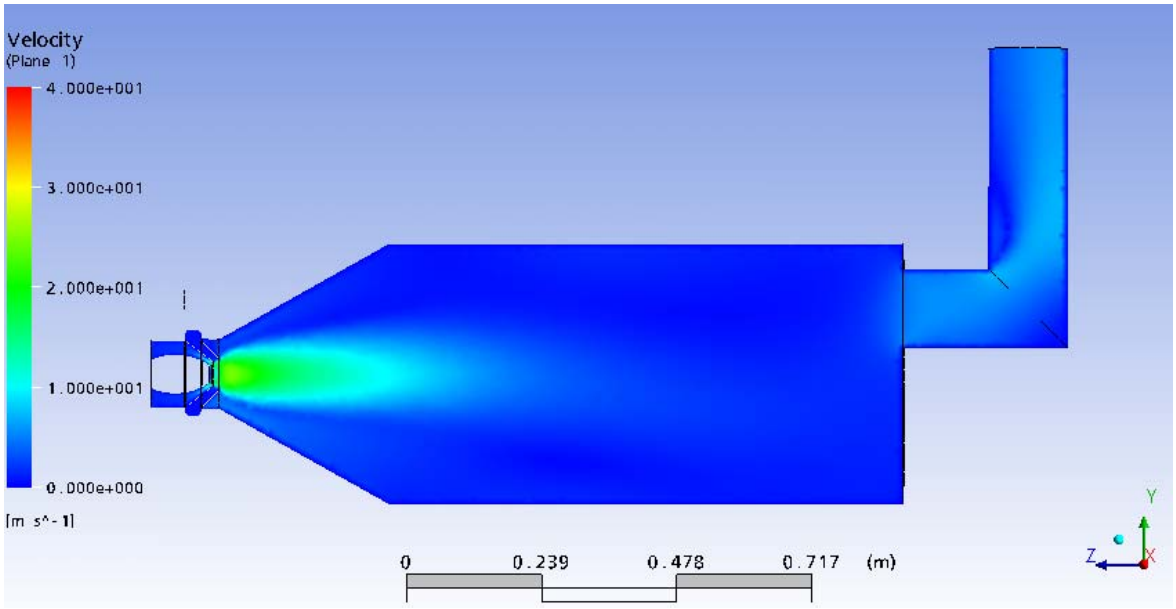

Figura 4.13 Perfil de velocidades para una relación A/C de 90/8.5

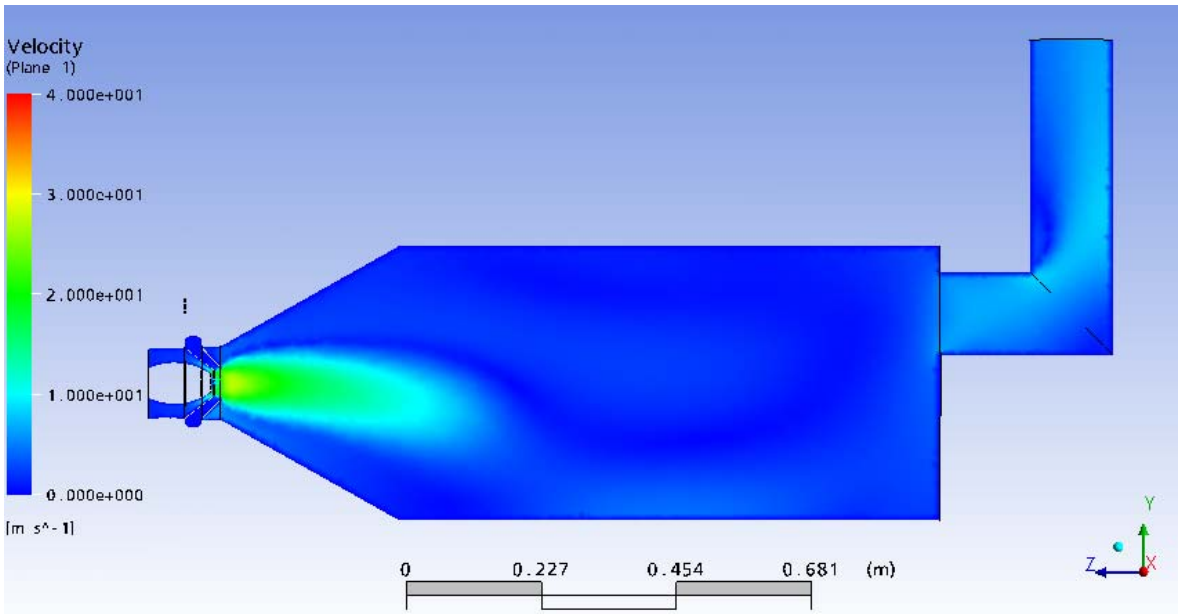

Figura 4.14 Perfil de velocidades para una relación A/C de 100/8.5

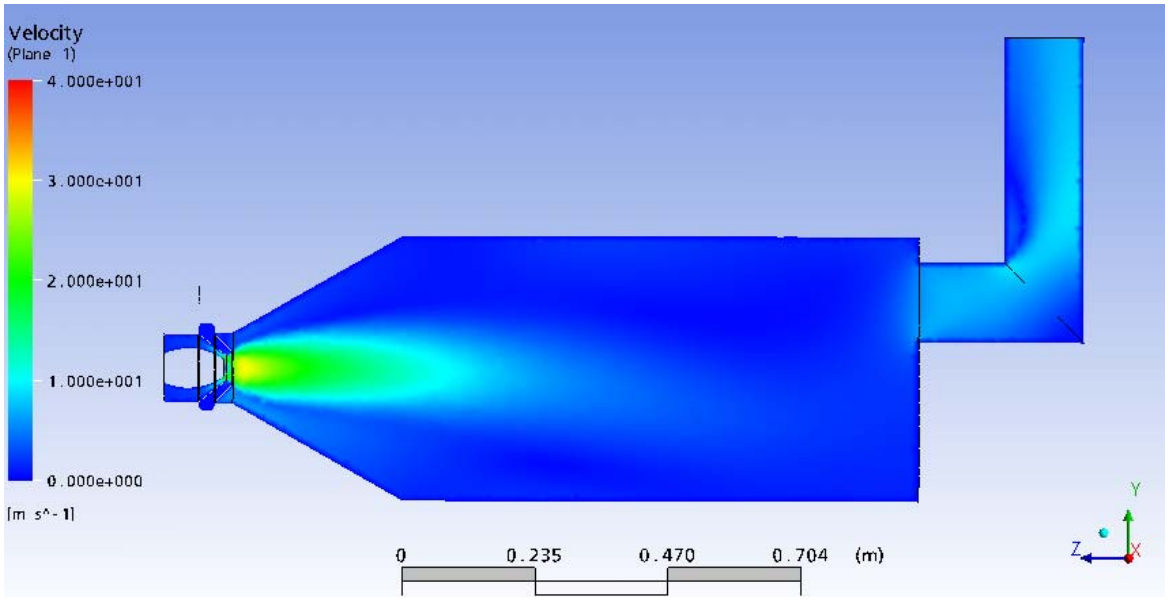

Figura 4.15 Perfil de velocidades para una relación A/C de 110/8.5

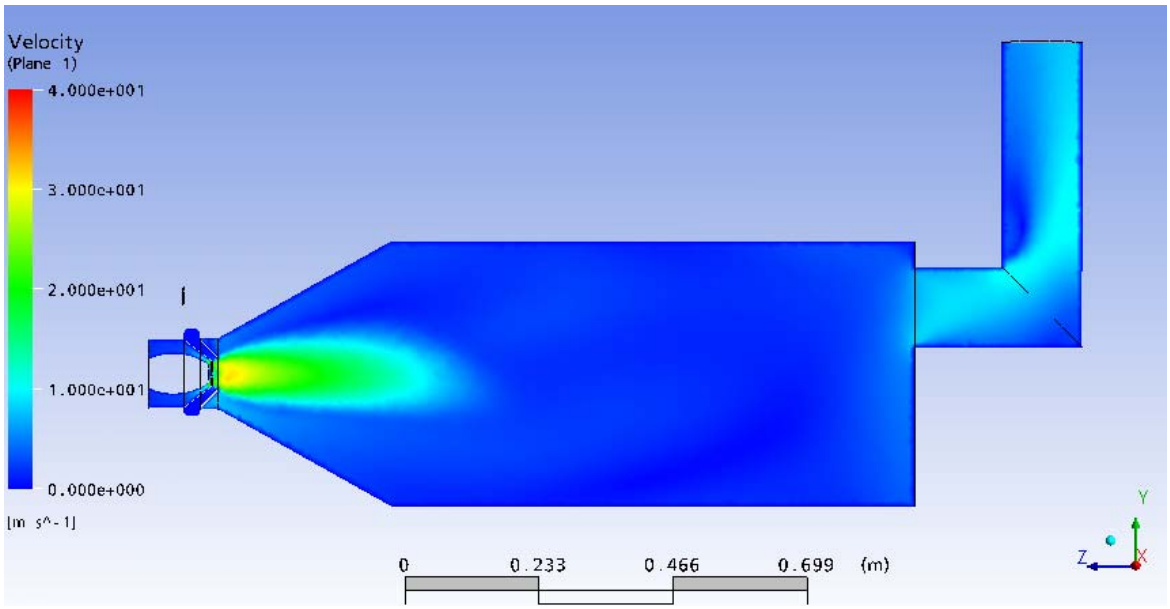

Figura 4.16 Perfil de velocidades para una relación A/C de 120/8.5

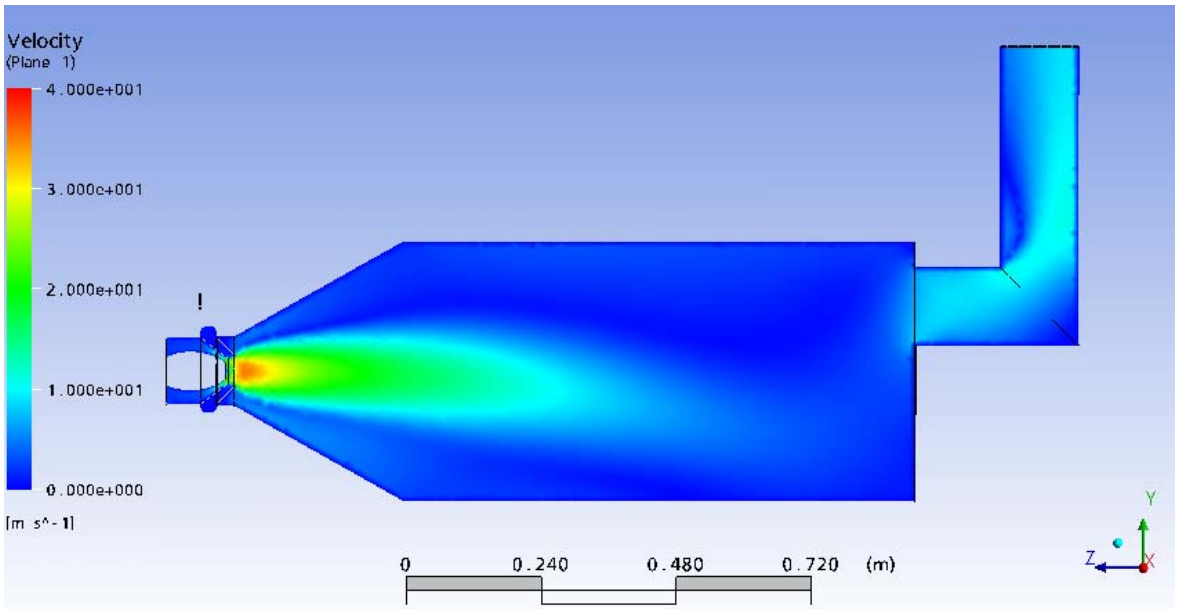

Figura 4.17 Perfil de velocidades para una relación A/C de 135/8.5

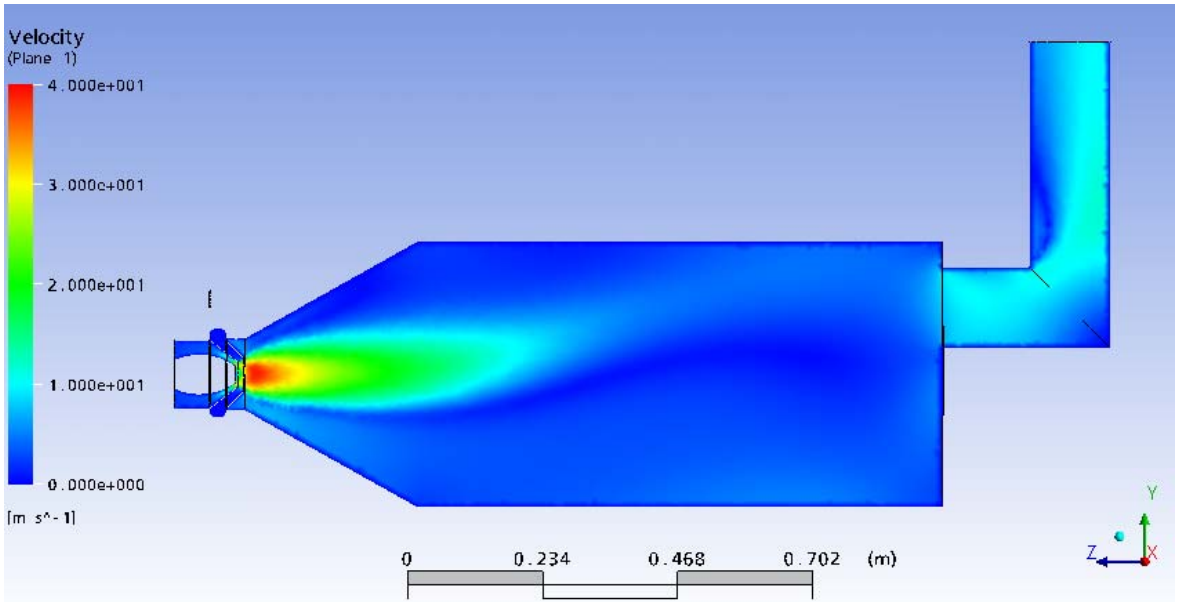

Figura 4.18 Perfil de velocidades para una relación A/C de 153/8.5

4.4.4 Perfiles de Presión

Los campos de presión obtenidos en la simulación numérica para las diferentes relaciones aire/combustible se presentan a continuación. En general los perfiles de presión para todas las simulaciones muestran las mismas características mostrando presiones prácticamente constantes dentro de la cámara cilíndrica, lo que indica que el proceso de combustión se lleva a cabo a presión constante. Cabe resaltar que las presiones más altas se encuentran en la zona de entrada de aire donde al ser un área cerrada, toda la energía del flujo aportada por el ventilador centrífugo se concentra en esta zona, a medida que el flujo de aire entra a la tobera se observa como la presión comienza a disminuir dando lugar a un aumento en la velocidad del aire, esta

velocidad es necesaria para el proceso de mezcla. Esto sucede de forma similar en todas las simulaciones a diferencia de que para la zona de entrada de aire, a medida que se incrementa el flujo de aire suministrado por el ventilador centrífugo sucede un leve incremento de la presión en esta zona, producto del mayor suministro de flujo.

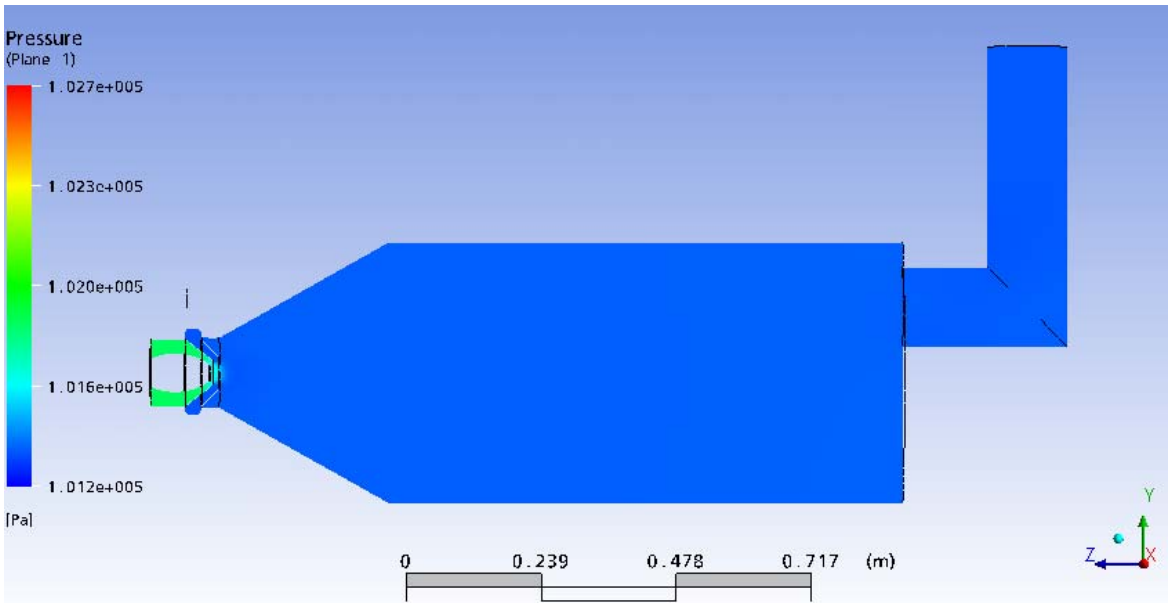

Figura 4.19 Perfil de presiones para una relación A/C de 90/8.5

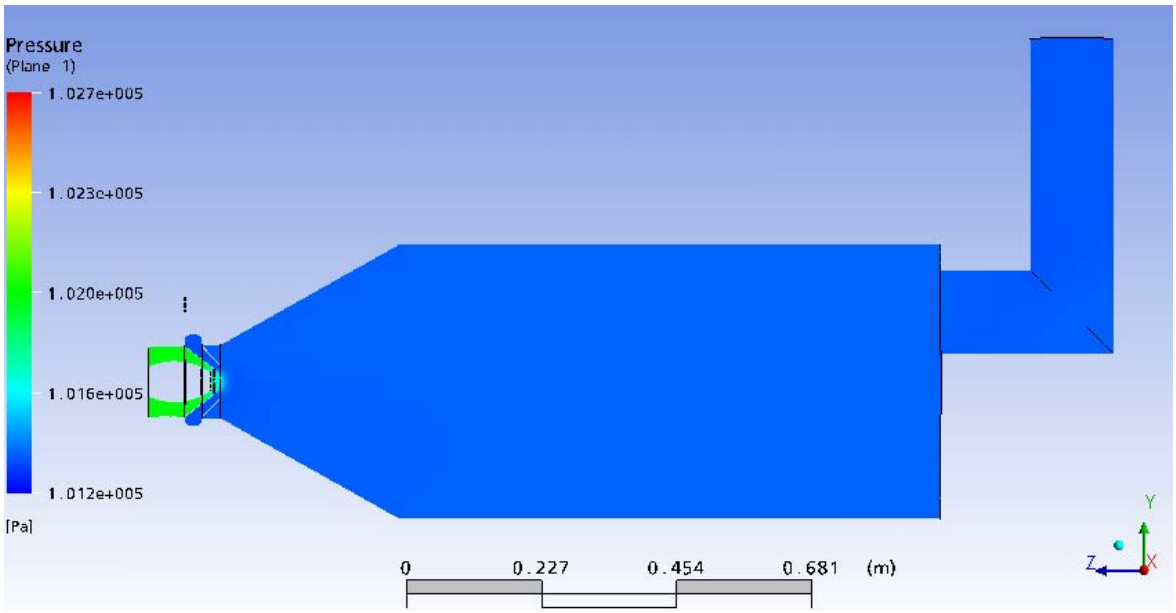

Figura 4.20 Perfil de presiones para una relación A/C de 100/8.5

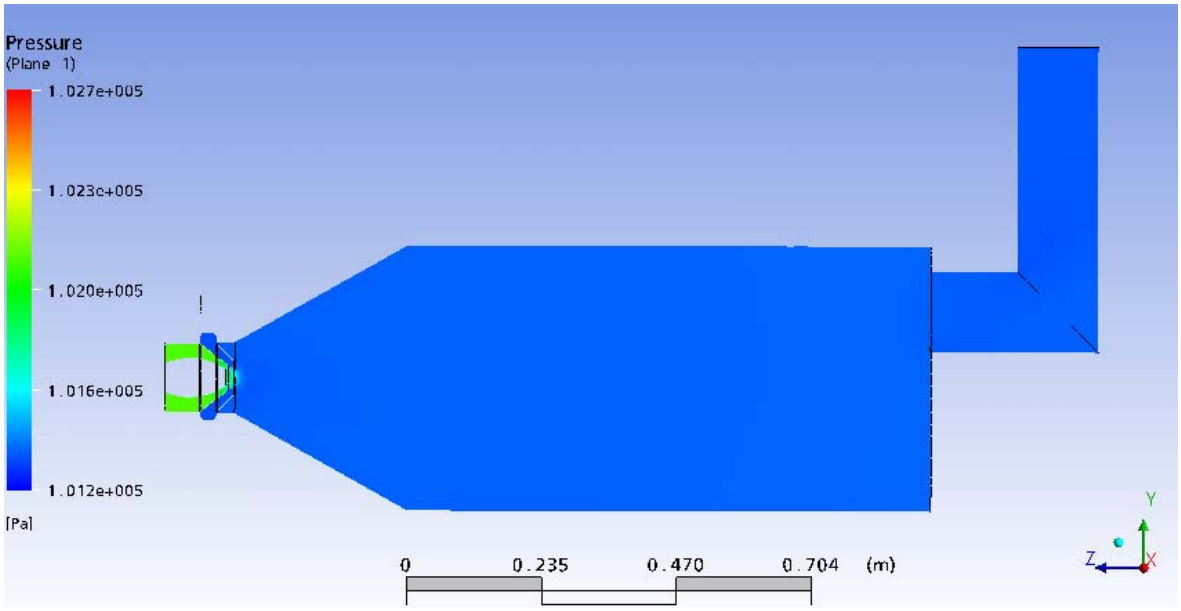

Figura 4.21 Perfil de presiones para una relación A/C de 110/8.5

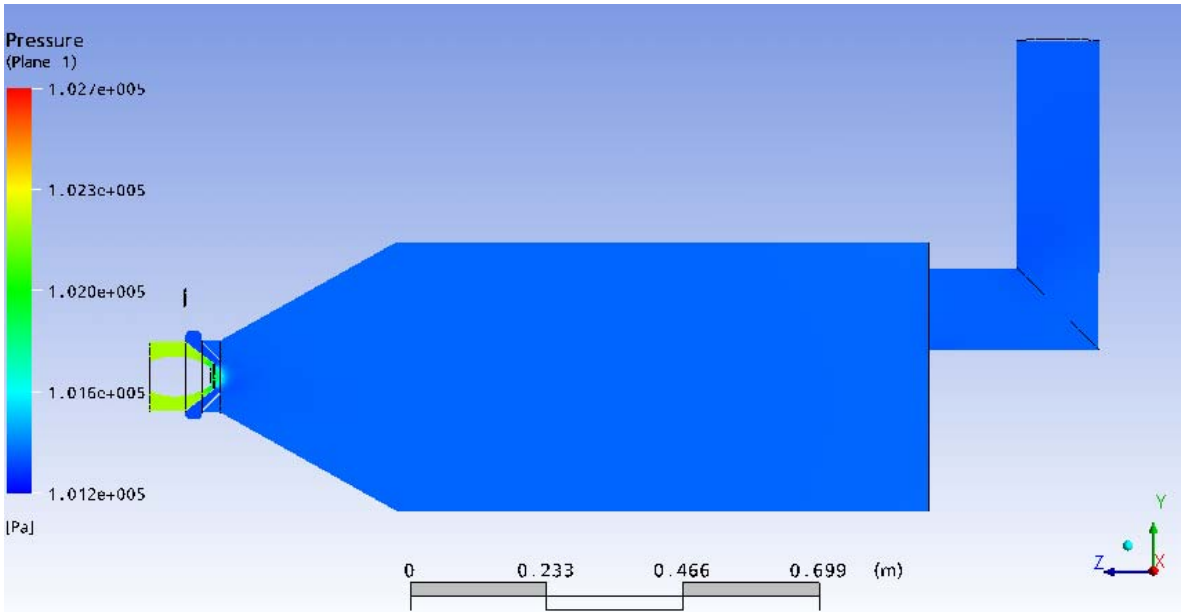

Figura 4.22 Perfil de presiones para una relación A/C de 120/8.5

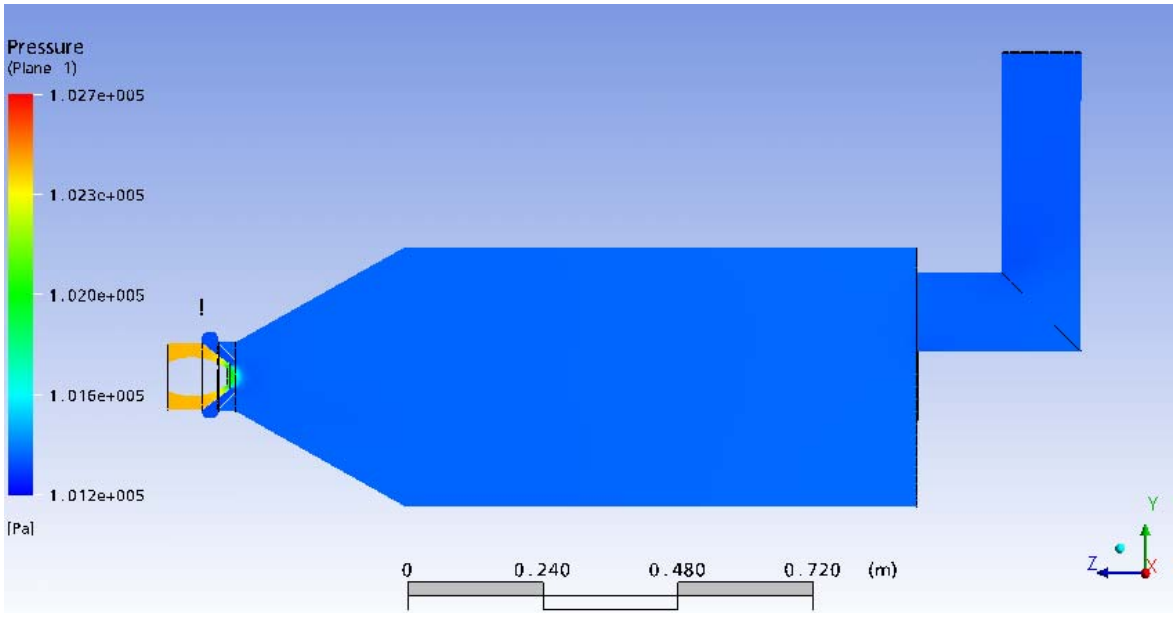

Figura 4.23 Perfil de presiones para una relación A/C de 135/8.5

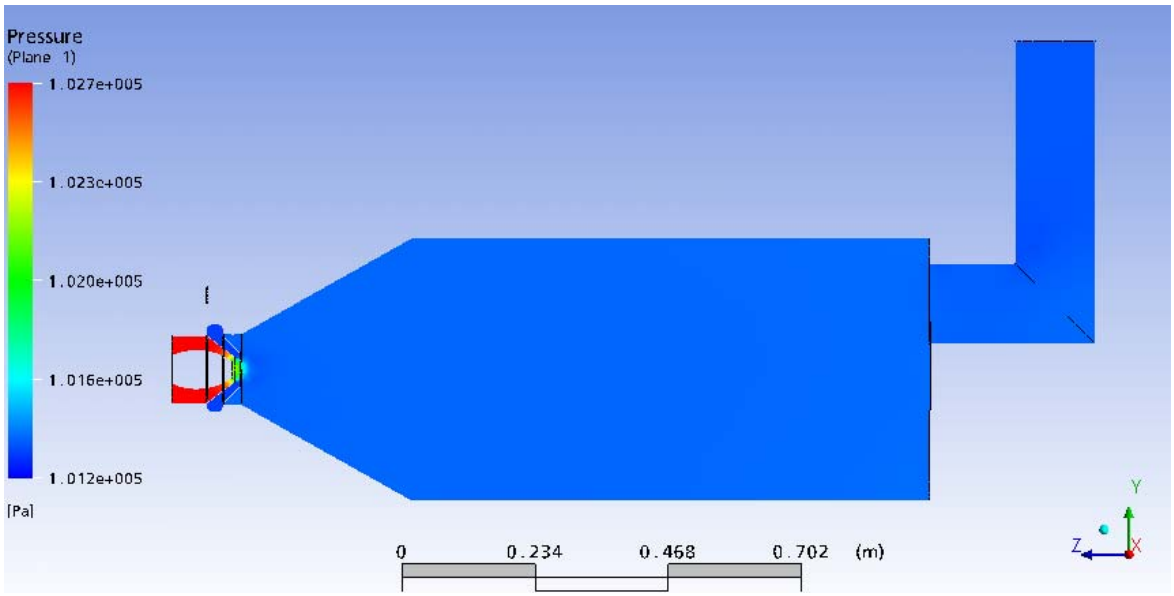

Figura 4.24 Perfil de presiones para una relación A/C de 153/8.5

4.5 REPRESENTACIÓN DE LAS LÍNEAS DE CORRIENTE DE LOS FLUIDOS

La figura 4.25 brinda una representación tridimensional de las líneas de corriente generadas en el proceso de combustión. Estas líneas proporcionan la trayectoria de flujo en el dominio computacional. Se observa que el flujo dentro de la cámara es desordenado y se forman remolinos producto del efecto torbellino dado por la configuración del ducto de entrada de aire, también pueden observarse recirculaciones de las líneas de los gases de combustión que no encuentran salida por el ducto de escape. Otro aspecto a resaltar es el desprendimiento del flujo en el tubo de escape que se produce por la velocidad a la que estos descargan lo que provoca que la capa de fluido se separe de las paredes del tubo de escape y forme un vacio en esta zona, es por esta razón que la velocidad se aprecia como nula en esta área.

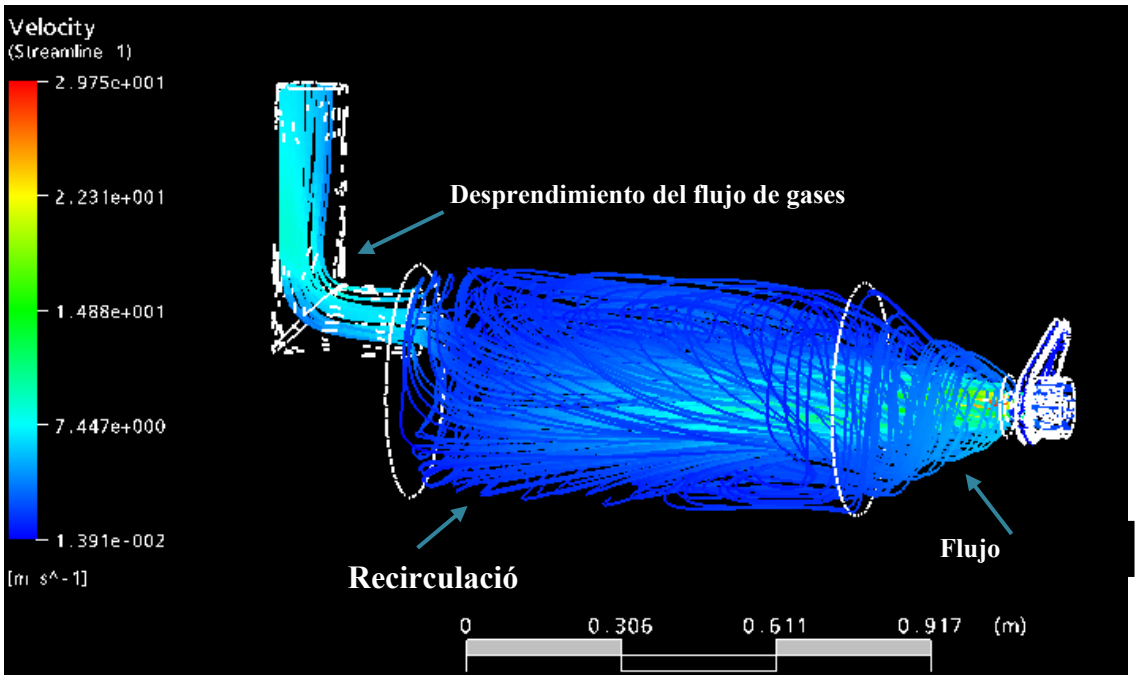

Figura 4.25 Líneas de corriente tridimensionales generadas en el proceso de combustión

A partir de la figura 4.26 hasta la figura 4.31 se muestran las líneas de corriente en el plano bidimensional YZ (plano medio vertical) para las distintas relaciones aire/combustible trabajadas en las simulaciones, estas figuras brindaron las trayectorias del flujo en el plano bidimensional, donde se observa a detalle los vórtices y las recirculaciones del flujo en la cámara cilíndrica. Estos fenómenos no tienen una tendencia definida, sino que varían para cada relación aire/combustible, los vórtices y las recirculaciones se producen por la configuración geométrica de la cámara de combustión ya que no todos los gases encuentran su salida directamente por el tubo de escape a la velocidad a la que se encuentran, lo que origina desviaciones en la trayectoria del flujo condicionando con esto los campos de velocidad dentro de la cámara, afectando también la forma de la llama y con esto los campos de temperaturas generados, por lo que la configuración de la cámara de combustión incide sobre los perfiles de velocidad y temperatura obtenidos en el proceso de combustión.

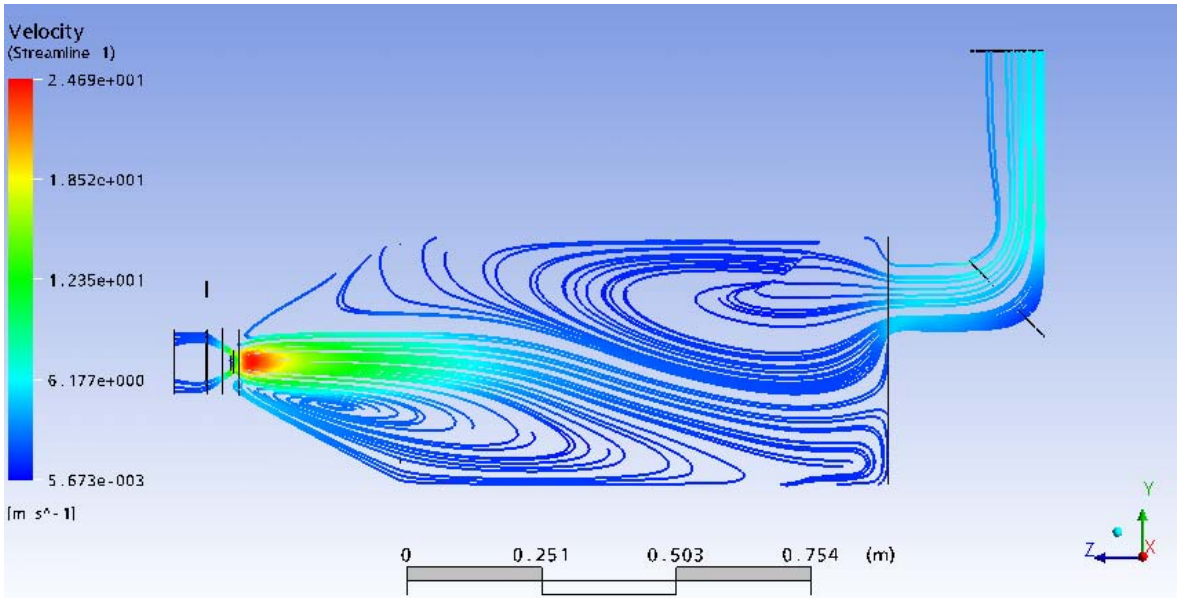

Figura 4.26 Líneas de corriente bidimensionales generadas para la relación aire/combustible de 90/8,5

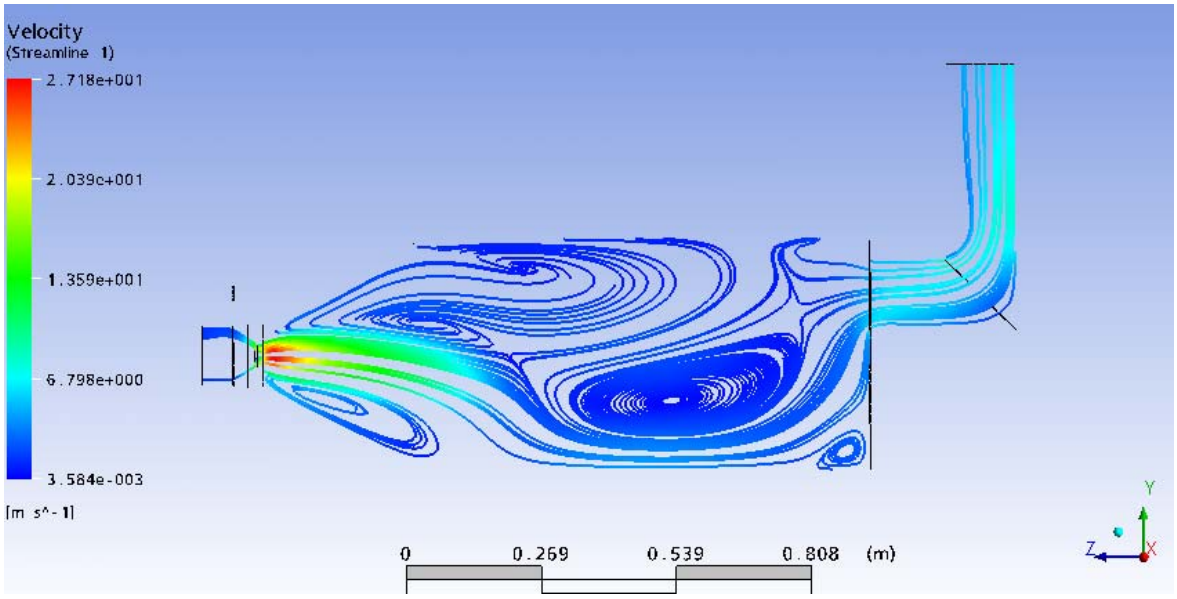

Figura 4.27 Líneas de corriente bidimensionales generadas para la relación aire/combustible de 100/8,5

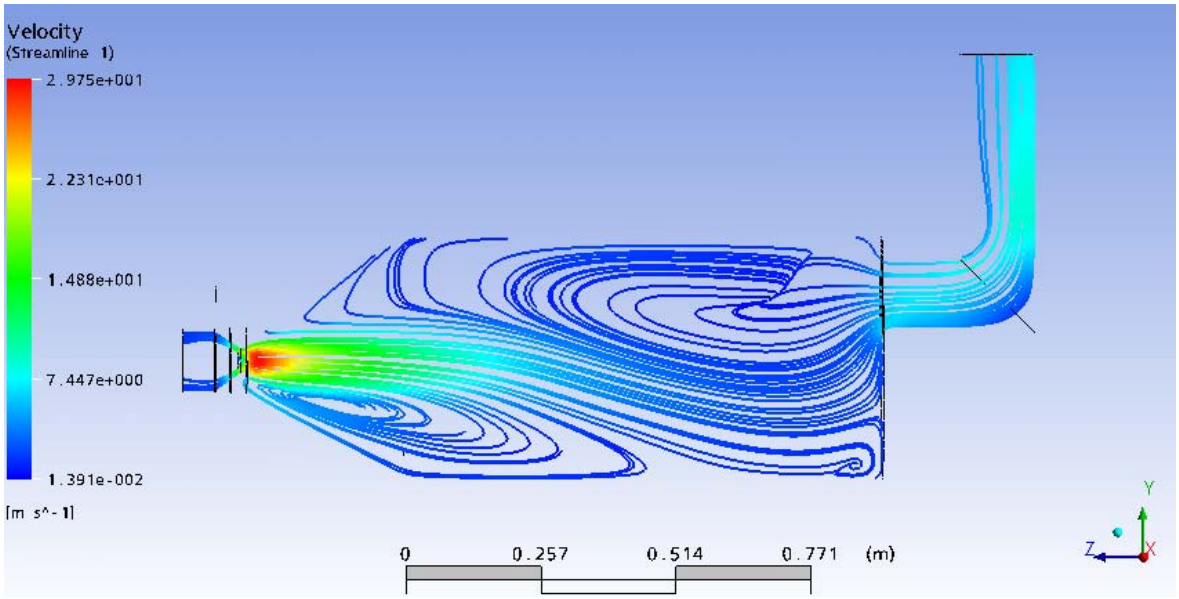

Figura 4.28 Líneas de corriente bidimensionales generadas para la relación aire/combustible de 110/8,5

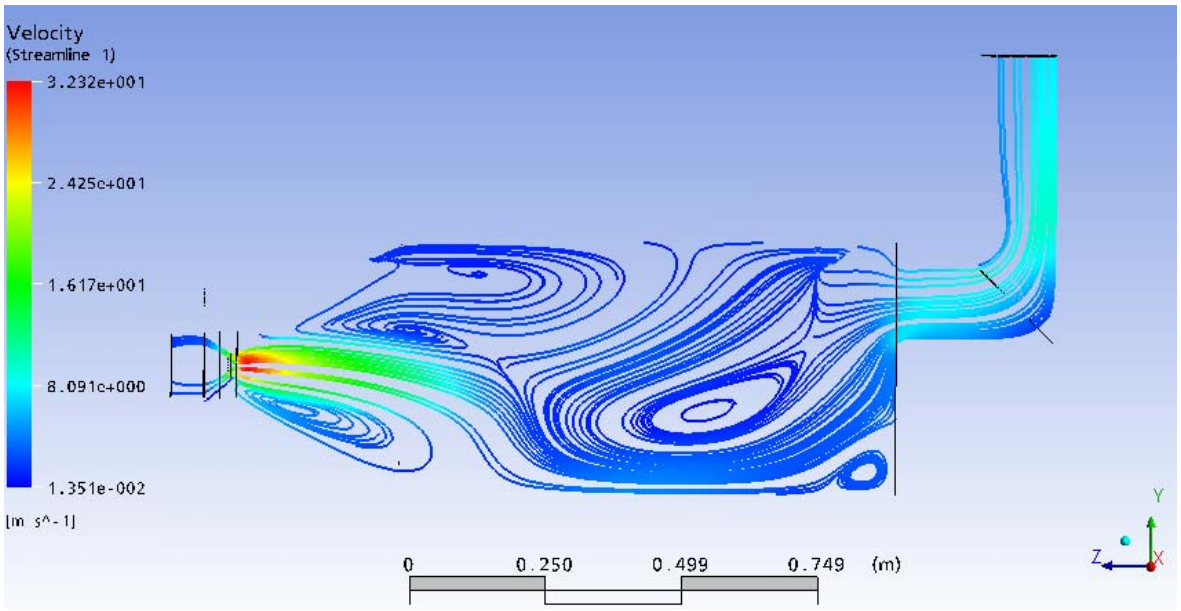

Figura 4.29 Líneas de corriente bidimensionales generadas para la relación aire/combustible de 120/8,5

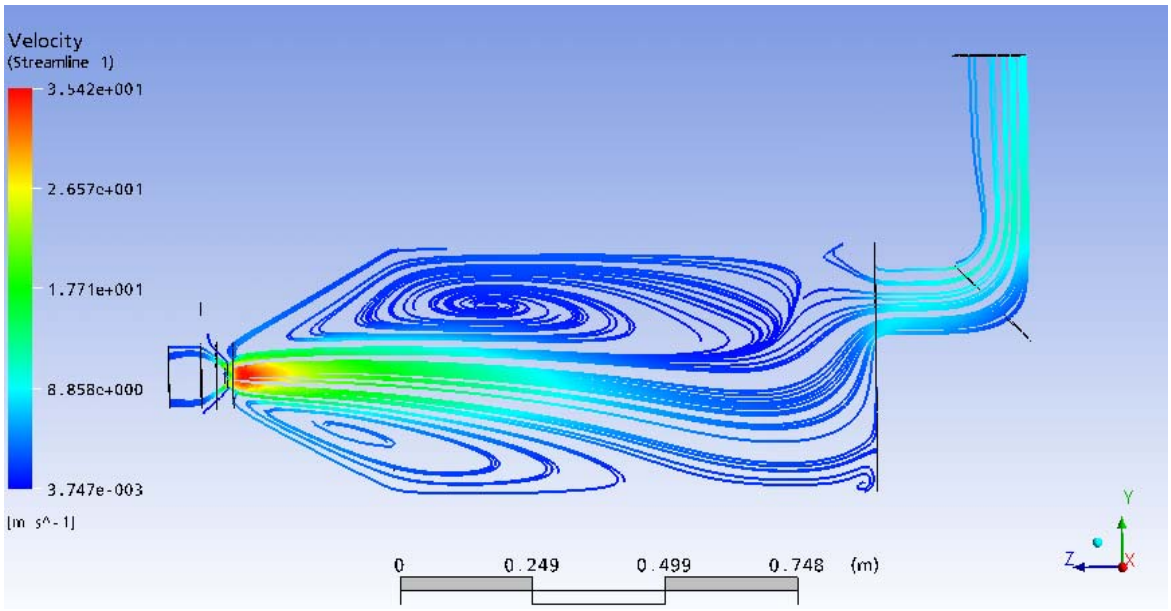

Figura 4.30 Líneas de corriente bidimensionales generadas para la relación aire/combustible de 135/8,5

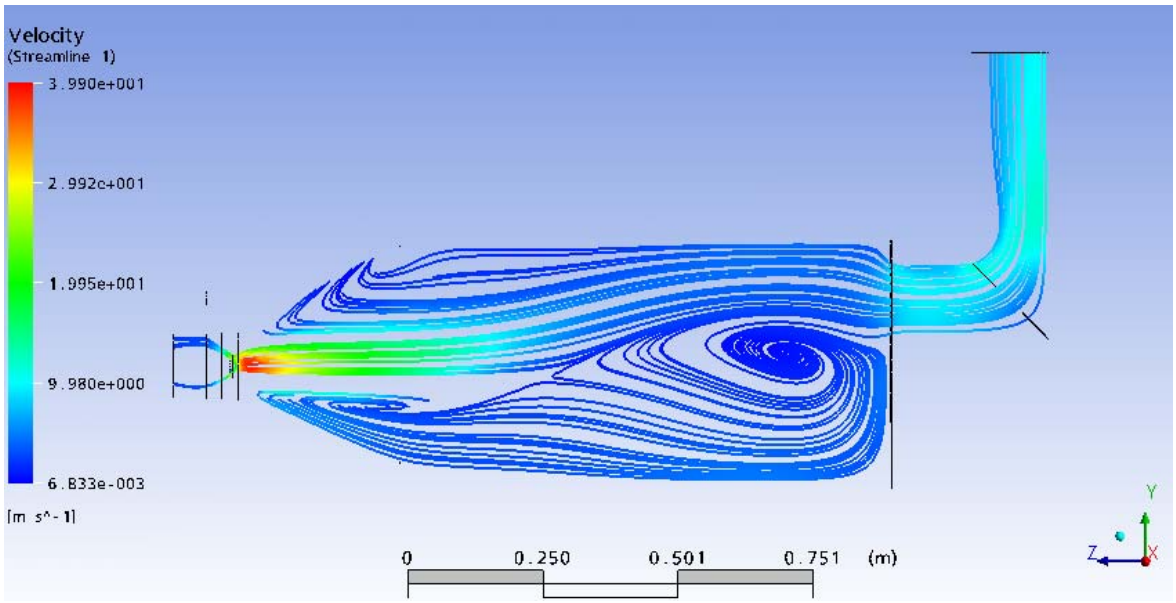

Figura 4.31 Líneas de corriente bidimensionales generadas para la relación aire/combustible de 155/8,5

4.6 REPRESENTACIÓN DE LOS CAMPOS DE TEMPERATURA, VELOCIDAD Y LÍNEAS DE CORRIENTE EN EL PLANO HORIZONTAL (PLANO ZX).

Las figuras presentadas a continuación brindan una representación de los campos de temperatura, velocidad y líneas de corriente en el plano medio horizontal. Es importante destacar que estas figuras se encuentran todas a la misma escala de igual forma que las figuras presentadas en el punto 4.4 de este capítulo. Estas figuras nos brindan el análisis de estos campos desde otra perspectiva con la finalidad de obtener una mayor comprensión del proceso de combustión. Toda la dinámica del proceso se puede observar mediante estos perfiles, un aspecto a resaltar son los contornos de la llama observados en los campos de temperaturas, ya que se nota como la forma de llama se declina hacia un lado de la cámara cilíndrica (recordar que

las figuras presentadas están en el campo horizontal), esta declinación observadas en todas la figuras de temperaturas se debe a los efectos de velocidad generados, el estudio de las líneas de corriente hizo notar los vórtices de flujo y la recirculación de los gases que no encuentran salida por el tubo de escape. Estos factores denotan que la forma de la llama se ve claramente afectada por estos fenómenos, aunque no se presenta una tendencia clara de los vórtices en las líneas de corriente, cabe destacar que la configuración geométrica de la cámara de combustión así como la configuración del quemador afectan directamente los campos de velocidad y temperatura obtenidos en el proceso de combustión.

RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE DE 90/8,5

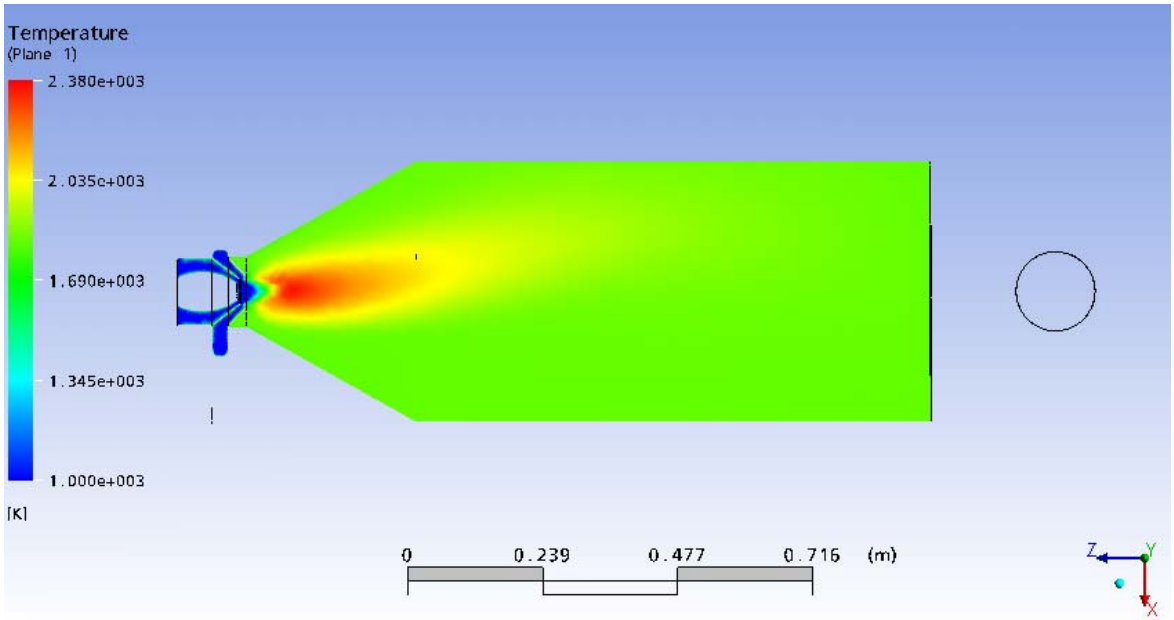

Figura 4.32 Perfil de Temperaturas en el plano horizontal para una relación A/C de 90/8,5

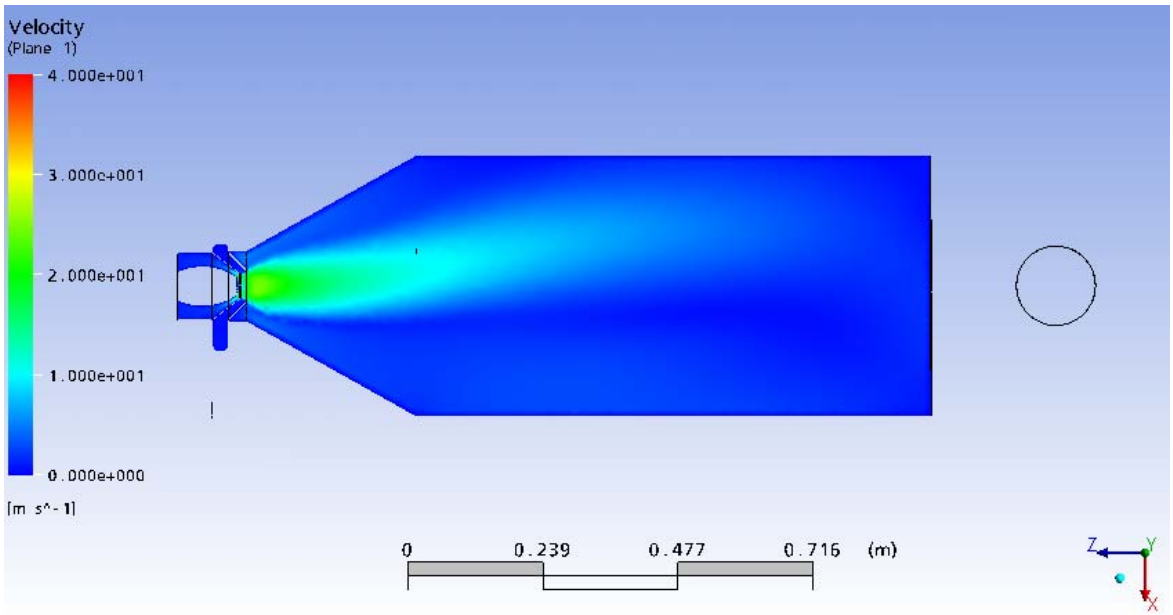

Figura 4.33 Perfil de velocidades en el plano horizontal para una relación A/C de 90/8,5

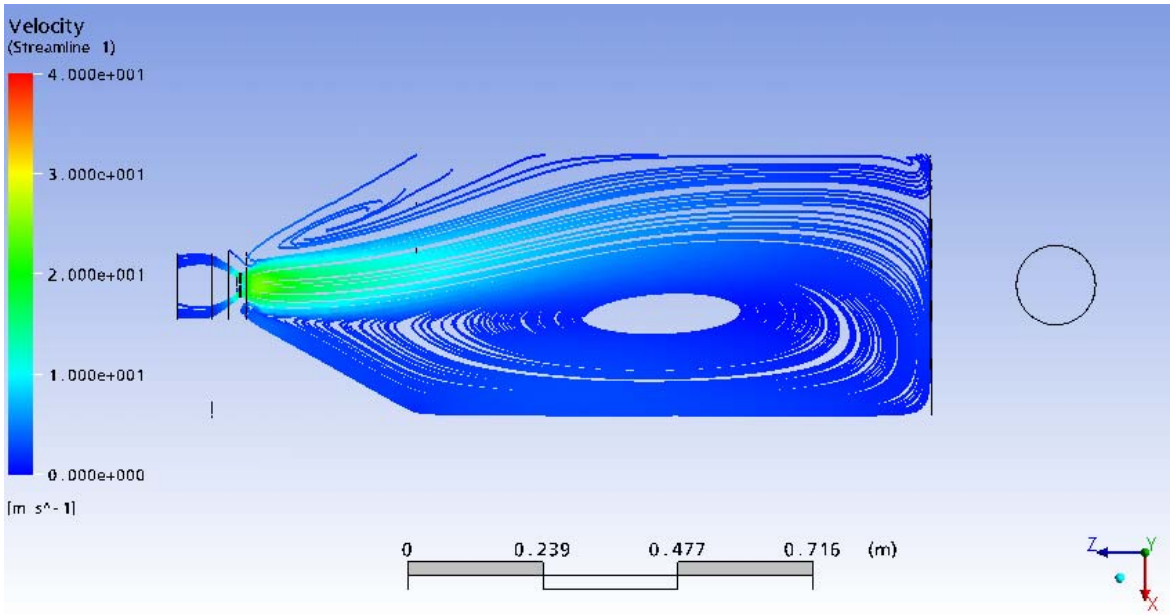

Figura 4.34 Líneas de corriente bidimensionales en el plano horizontal generadas para la relación aire/combustible de 90/8,5

RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE DE 100/8,5

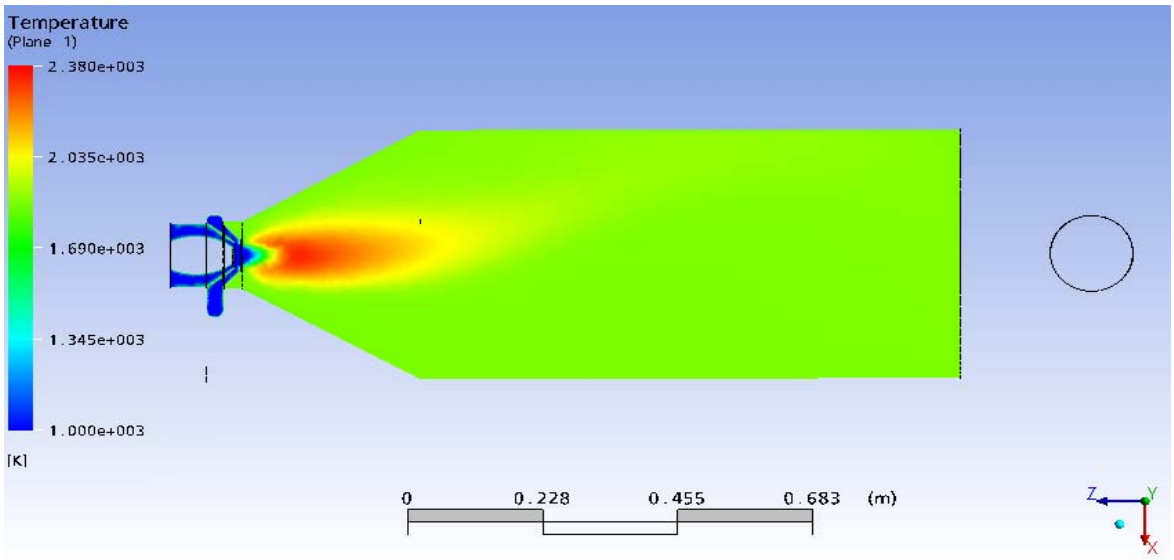

Figura 4.35 Perfil de Temperaturas en el plano horizontal para una relación A/C de 100/8,5

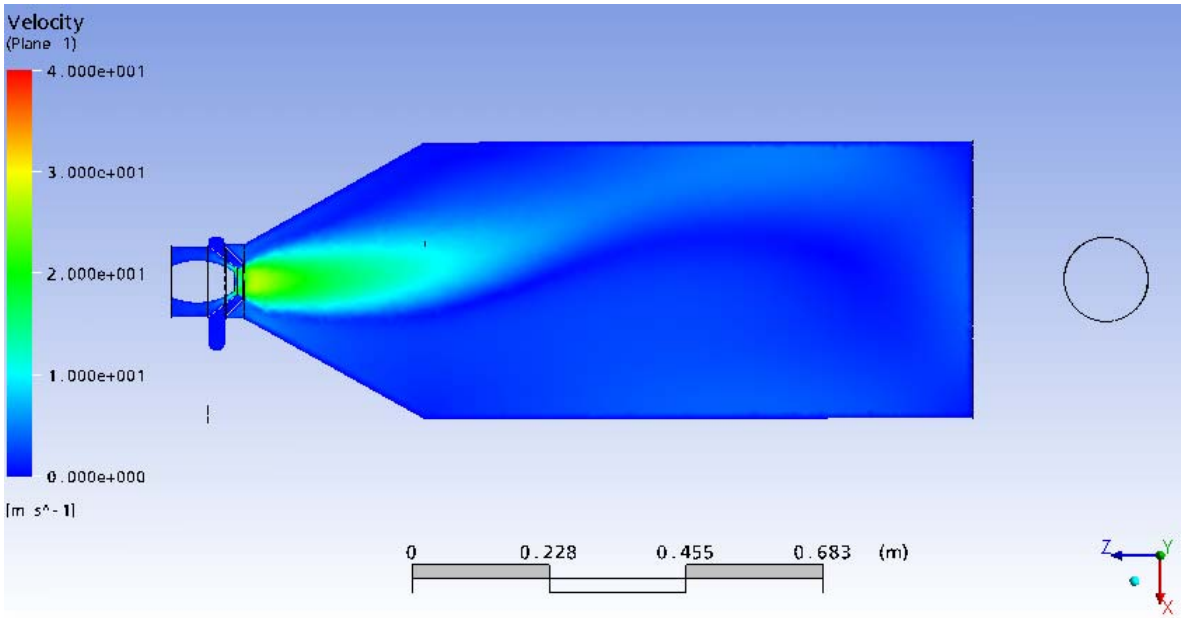

Figura 4.36 Perfil de velocidades en el plano horizontal para una relación A/C de 100/8,5

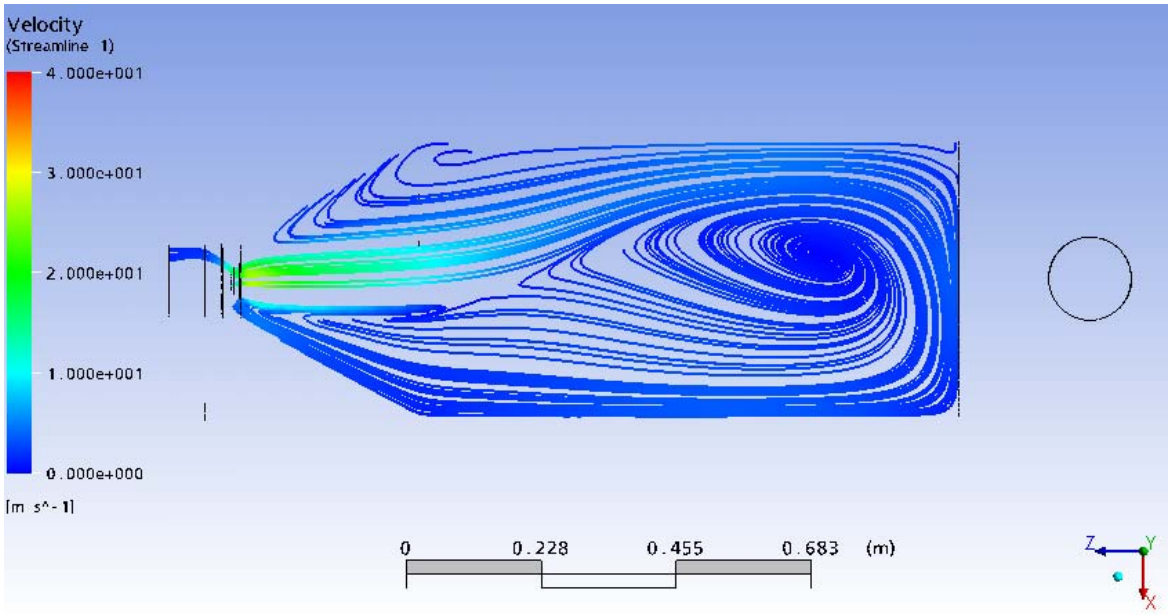

Figura 4.37 Líneas de corriente bidimensionales en el plano horizontal generadas para la relación aire/combustible de 100/8,5

RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE DE 110/8,5

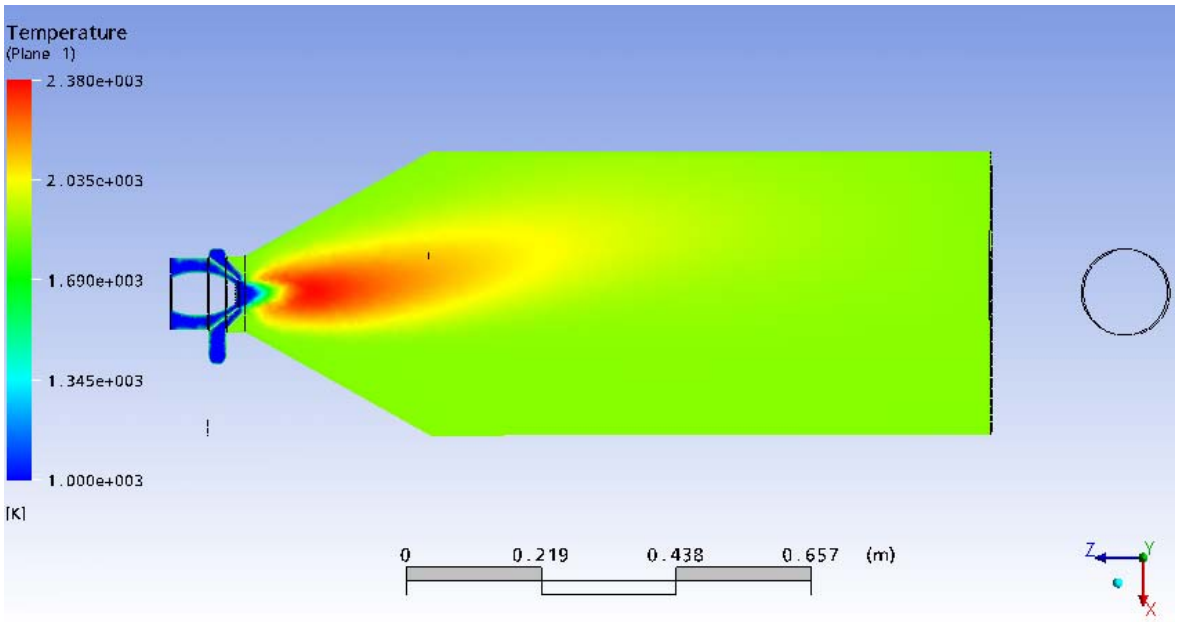

Figura 4.38 Perfil de Temperaturas en el plano horizontal para una relación A/C de 110/8,5

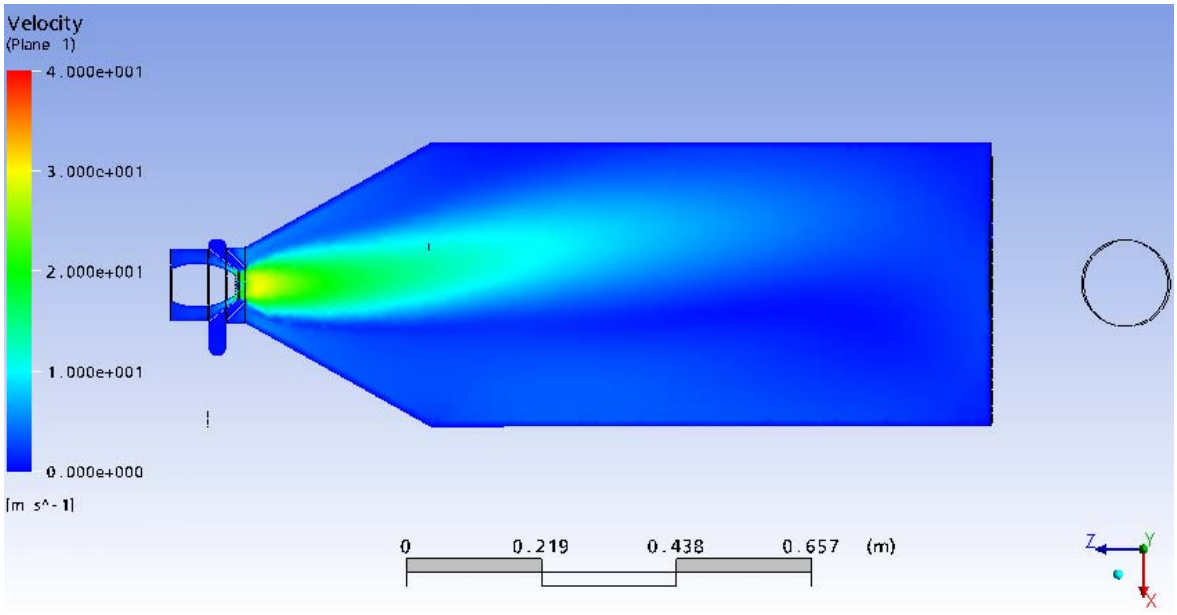

Figura 4.39 Perfil de velocidades en el plano horizontal para una relación A/C de 110/8,5

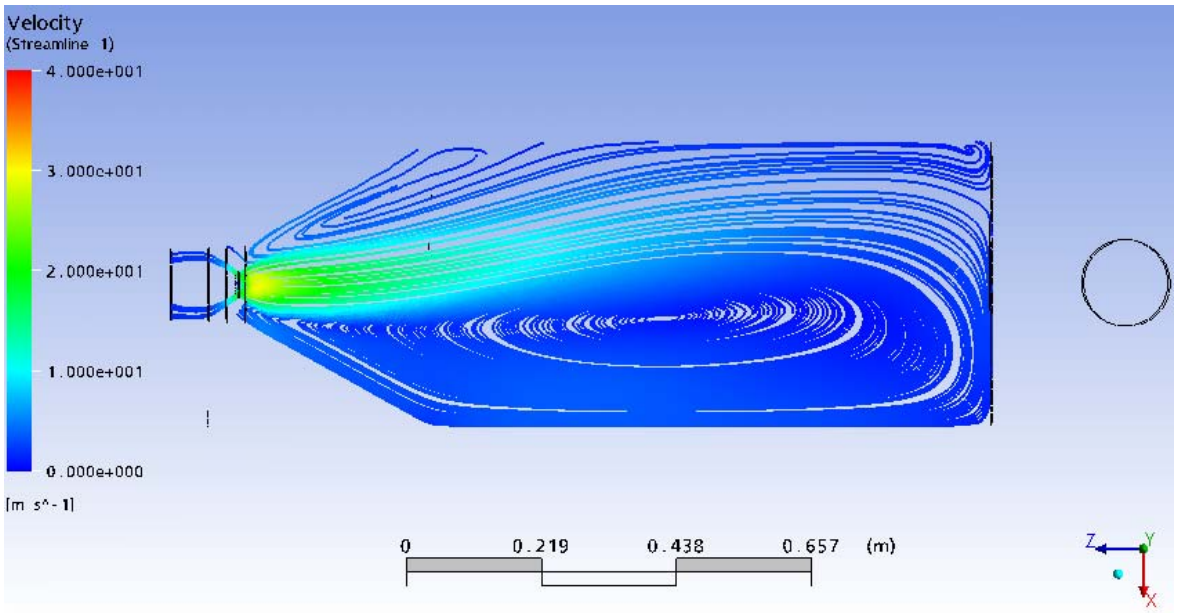

Figura 4.40 Líneas de corriente bidimensionales en el plano horizontal generadas para la relación aire/combustible de 110/8,5

RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE DE 120/8,5

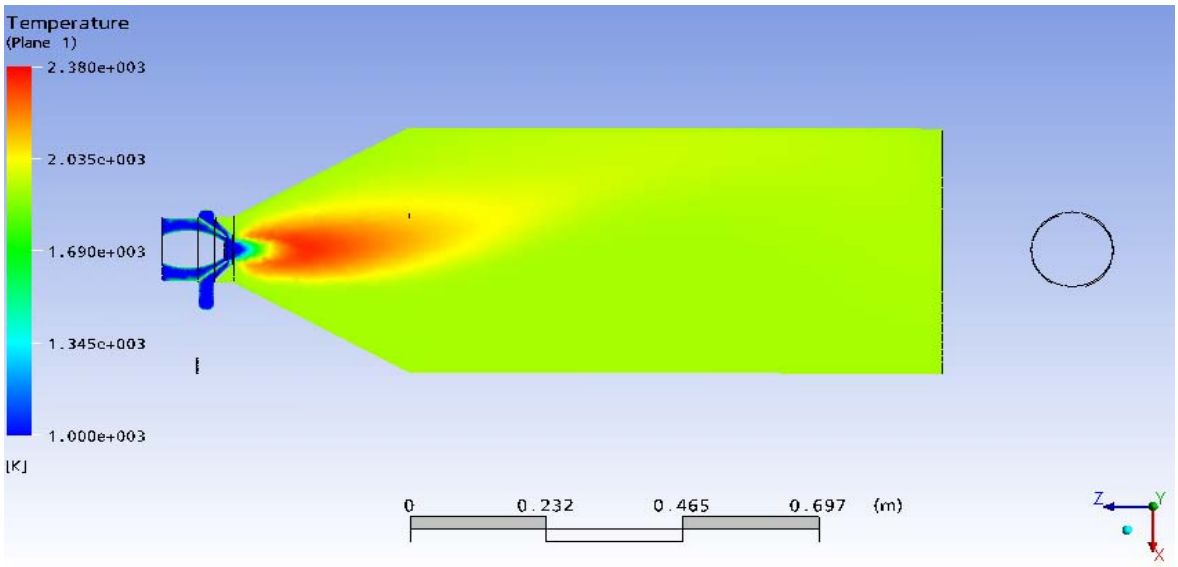

Figura 4.41 Perfil de Temperaturas en el plano horizontal para una relación A/C de 120/8,5

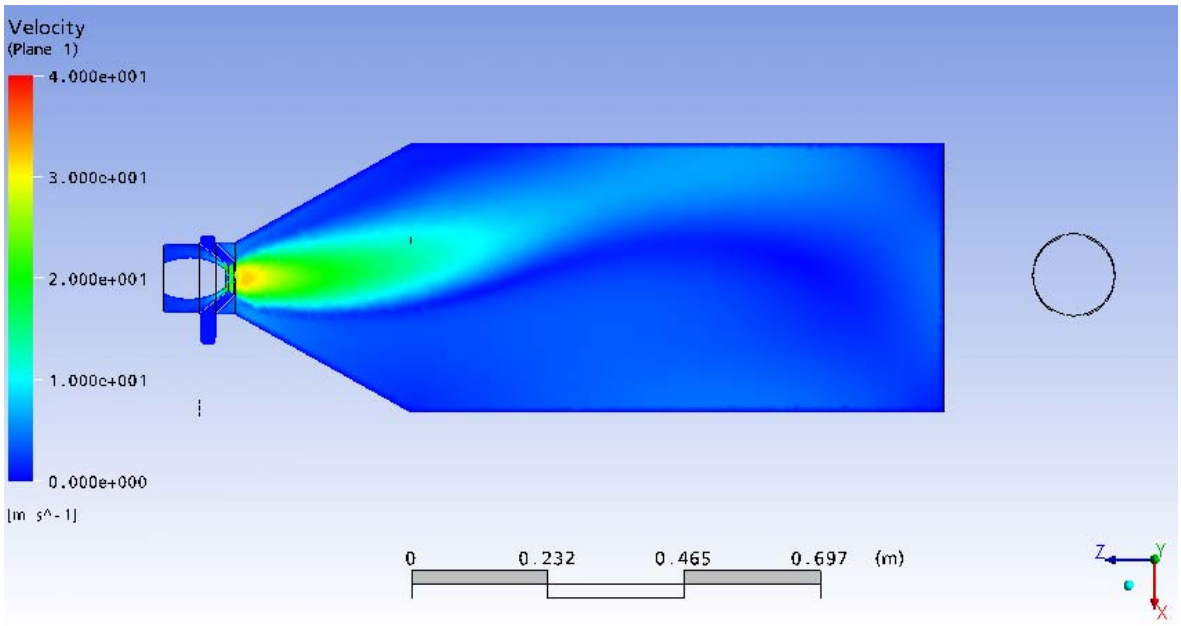

Figura 4.42 Perfil de velocidades en el plano horizontal para una relación A/C de 120/8,5

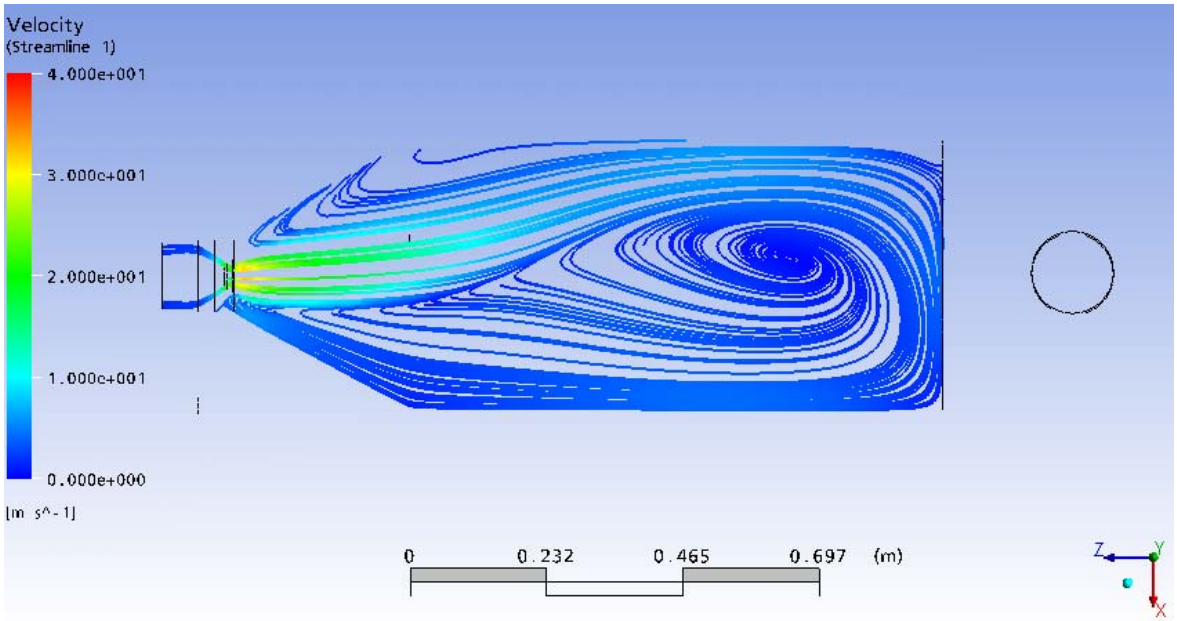

Figura 4.43 Líneas de corriente bidimensionales en el plano horizontal generadas para la relación aire/combustible de 120/8,5

RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE DE 135/8,5

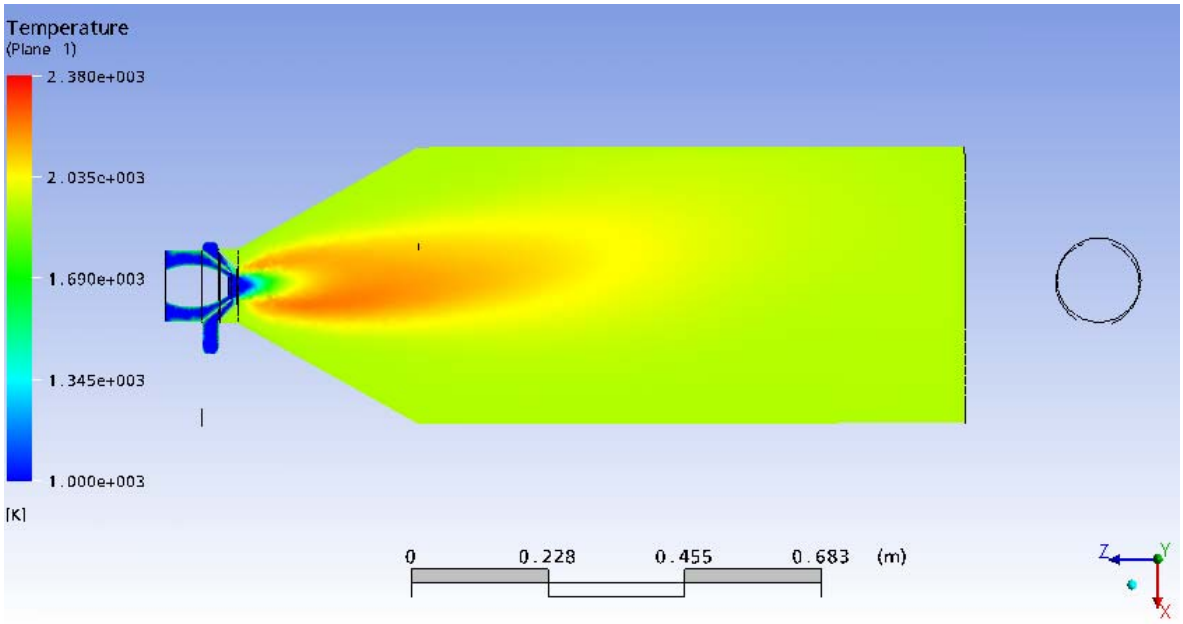

Figura 4.44 Perfil de Temperaturas en el plano horizontal para una relación A/C de 135/8,5

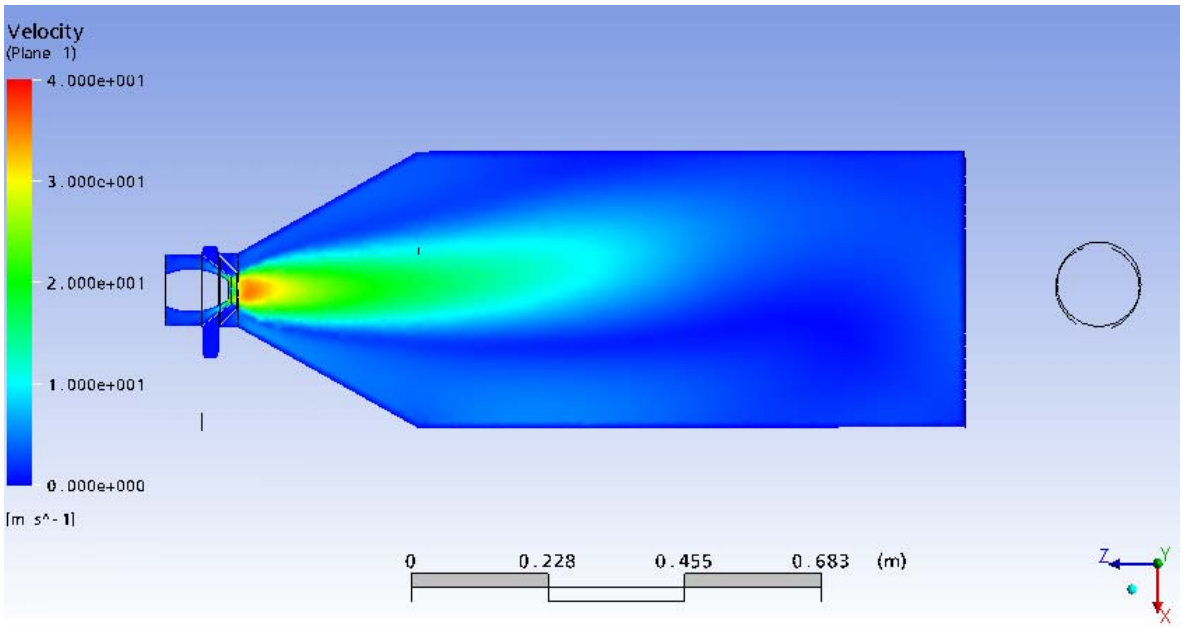

Figura 4.45 Perfil de velocidades en el plano horizontal para una relación A/C de 135/8,5

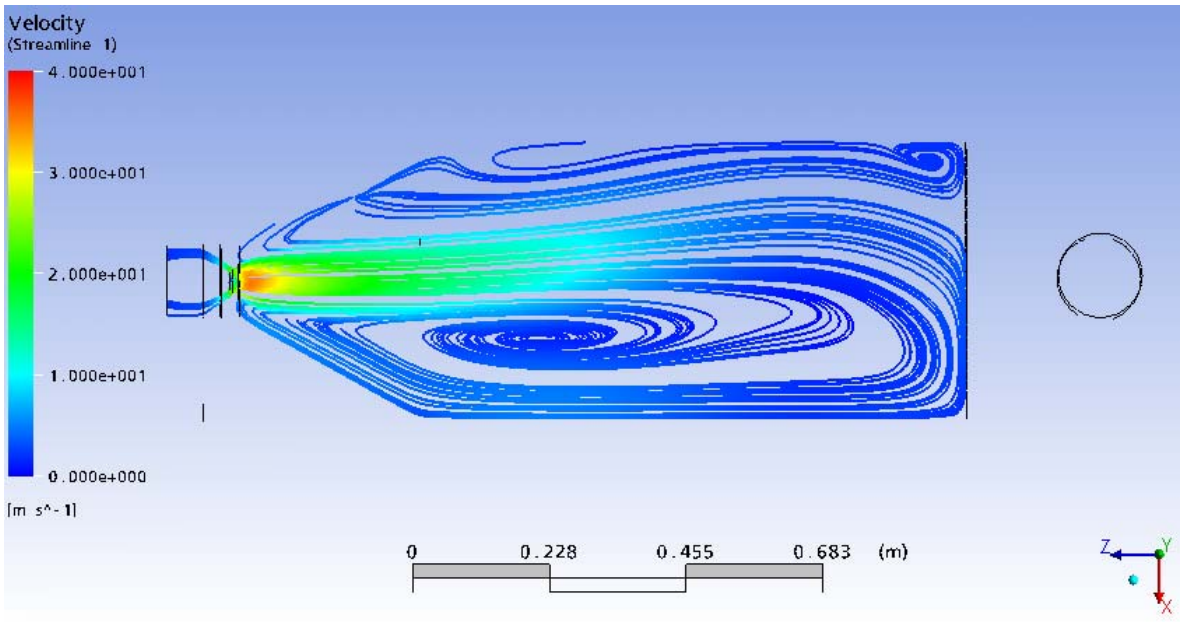

Figura 4.46 Líneas de corriente bidimensionales en el plano horizontal generadas para la relación aire/combustible de 135/8,5

RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE DE 155/8,5

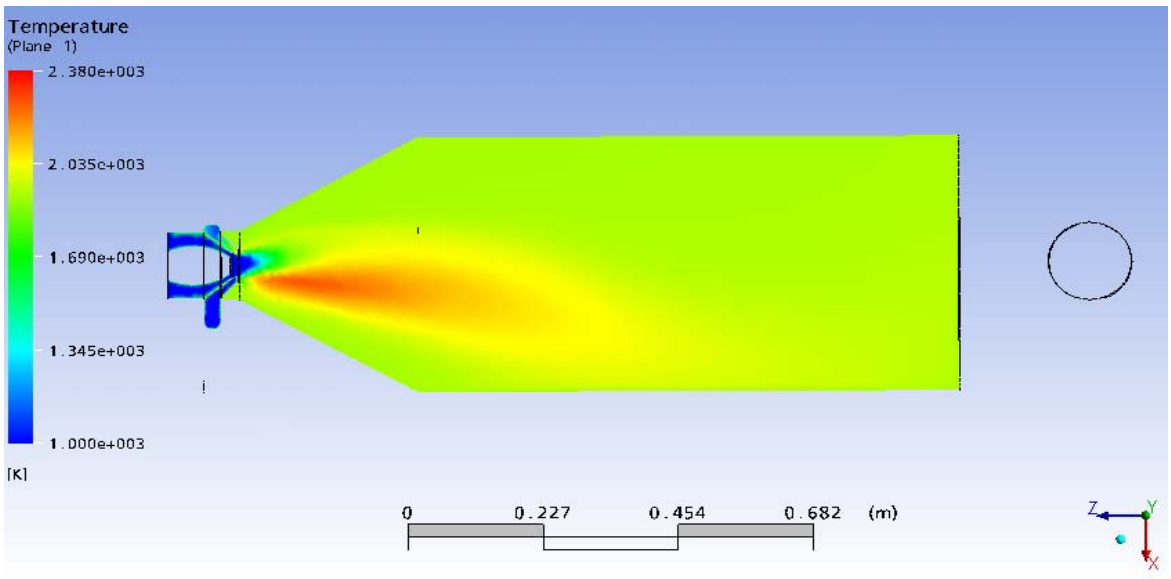

Figura 4.47 Perfil de Temperaturas en el plano horizontal para una relación A/C de 155/8,5

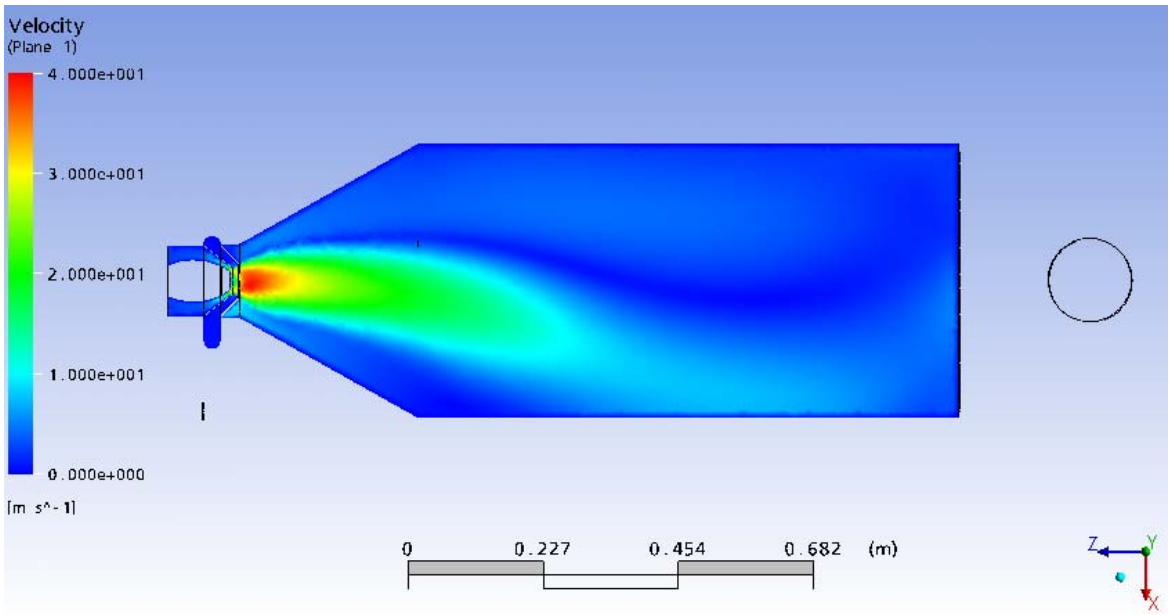

Figura 4.48 Perfil de velocidades en el plano horizontal para una relación A/C de 155/8,5

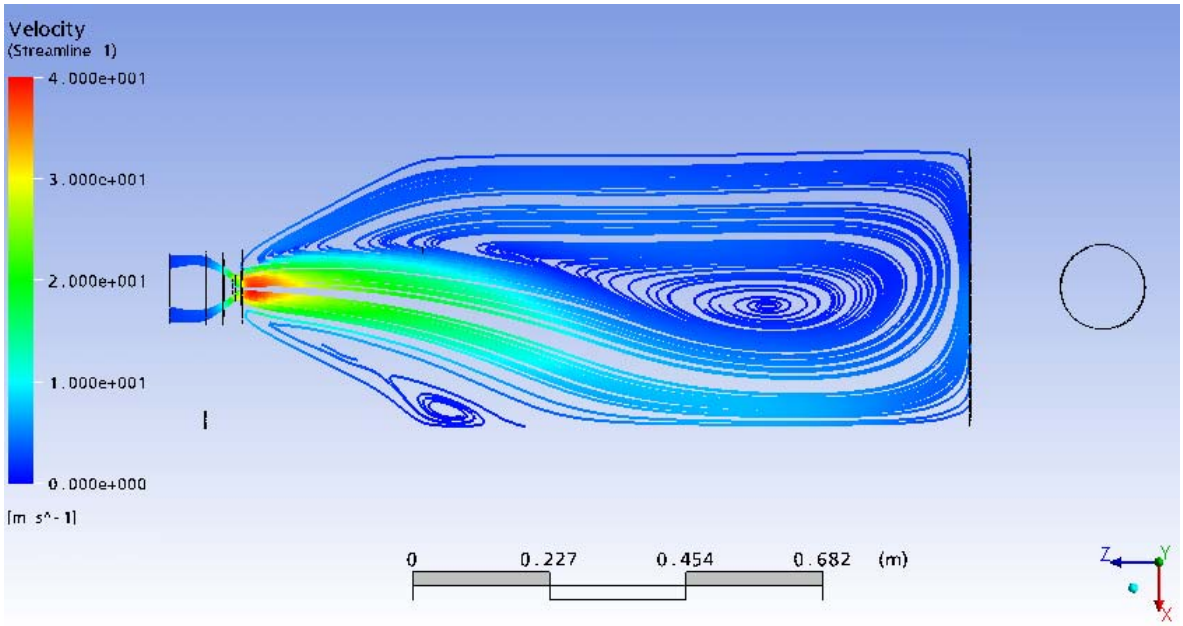

Figura 4.49 Líneas de corriente bidimensionales en el plano horizontal generadas para la relación aire/combustible de 155/8,5

CAPITULO V

5.1 CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en el trabajo de investigación se pueden emitir las siguientes conclusiones:

1. Las condiciones de borde impuestas en el dominio computacional permitieron simular correctamente el proceso de combustión propano-aire.
2. El modelo de turbulencia k-ε y el mecanismo cinético de disipación de remolino representaron razonablemente el comportamiento fluido-dinámico del flujo en la cámara de combustión.
3. El cálculo del calor absorbido por el agua de enfriamiento brindó una referencia para incluir este efecto en los valores de temperaturas simulados.
4. El aumento del flujo de aire y la relación aire/combustible altera el perfil de temperatura y velocidad en la llama y el resto de la cámara de combustión.
5. A mayores temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión, los gases productos se expanden proporcionando un aumento en la velocidad de los mismos dentro de la cámara cilíndrica.
6. La configuración geométrica de la cámara de combustión condiciona los campos de velocidades y temperaturas alcanzados en las simulaciones, ya que se demostró que la posición de la salida del escape afecta el campo de velocidades.
7. Los resultados obtenidos en las simulaciones se validaron directamente con los resultados experimentales generándose porcentajes de error inferiores a 4%, lo cual demustra la efectividad del uso de CFD para la predicción de la combustión.
8. El análisis de los campos de velocidad, presión y temperatura obtenidos en la simulación numérica permitieron una mayor compresión de las variables del

proceso de combustión, como flujo de aire, la relación aire combustible, enfriamiento de la cámara, geometría de la cámara y posición del escape.

5.2 RECOMENDACIONES

1. Incluir en la construcción del dominio computacional, una configuración más detallada que contemple directamente el efecto del enfriamiento del agua en la simulación.
2. Simular numéricamente el proceso de combustión mediante otros modelos de turbulencia contenidos en el paquete comercial CFX para una verificación de los resultados obtenidos.
3. Abordar la cinética de la reacción utilizando otros modelos de combustión que, de repente, tengan una mayor sensibilidad y robustez en la previsión de temperaturas y especies químicas.
4. Proponer un plan de mantenimiento periódico a la unidad de combustión para futuras investigaciones destinadas al estudio, tecnología y posibles aplicaciones de otros combustibles de interés industrial.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA CITADA

1. Escalante, H., Álvarez, A., Torres, M., **"Simulación numérica de la combustión del metano en presencia de aire, en una cámara de combustión experimental"**. Programa de Simulación Numérica de flujo de fluidos. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional Experimental del Táchira. San Cristóbal, Táchira. Venezuela, (2001).
2. Escalante, H., Álvarez, A., Torres, M., **"Simulación tridimensional del flujo no reactivo estacionario, incompresible y turbulento en la cámara de combustión de la turbina de gas T200D, para predecir los campos de temperatura y velocidad"**. Programa de Simulación Numérica de flujo de fluidos. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional Experimental del Táchira. San Cristóbal, Táchira. Venezuela, (2001).
3. López, T., **"Simulación numérica del proceso de combustión en una cámara de combustión continua"**. Programa Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui. Venezuela. (2008).
4. Lapuerta, A.; Hernández, A., **"Tecnologías de la Combustión"**. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, 1ra edición, España, (1998).
5. Márquez, Manuel, **"Combustión y Quemadores"**. Editorial Marcombo S.A., España 2005.
6. Spalding, Brian, "**Combustión y transferencia de masa**", Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. 1983.
7. AMELL, A., BARRAZA L. y GÓMEZ, E. **"Tecnología de la combustión de los gases y quemadores atmosféricos de premezcla"**. Medellín: Universidad de Antioquia, 1996.

8. Manual ANSYS CFX (11.0).
9. Ballesteros, R., **"Técnicas numéricas en Mecánica de Fluidos"**. Área de Mecánica de Fluidos. Universidad de Oviedo, España, (2003).
10. Eugene, Avallone, **"Manual del Ingeniero Mecánico",** McGraw-Hill, Colombia (1995).
11. Baukal, Charles Computational Fluid Dynamics in Industrial Combustion. Editado por CRC Press, U.S. (2001)
12. Rosner, Daniel "**Transport Processes in Chemically Reacting Flowsystems"**, (2000).
13. Marval, E y Ramírez, A. **Estudio Comparativo de los Modelos Kappa Épsilon (k-ε) en la Simulación de Flujo Turbulento**. Trabajo Especial de Grado. Universidad del Zulia. Maracaibo. Venezuela. (2003).
14. P.A. HILTON LTD. **Manual de especificaciones técnicas del equipo**. Horsebridge Mill, King's Somborne, Hants, Inglaterra.

BIBIOGRAFÍA ADICIONAL

- Jiménez, J., **"La Simulación Numérica en Turbulencia",** Universidad Politécnica Madrid, (2003).
- **"Curso Básico de Combustión para Ingenieros"**, INTEVEP S.A, Los Teques, Venezuela, (1995).
- Bode, J., **"Computational Fluid Dynamics Applications in the Chemical Industry"**, Computers Chemical Engineering, (1994).
- Versteeg, H.K. y Malalasekera. **An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method.** Longman Group. (1999).

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN CON FLUJO TORBELLINO DEL AIRE EN EL QUEMADOR EN UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN CONTINUA
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Centeno P. Jesús E.	CVLAC: 17.535.810 EMAIL: jesuscenteno2@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Simulación, Combustión, Torbellino, Quemador

_____

_____

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
Ingeniería y ciencias aplicada	Ingeniería Mecánica

RESUMEN (ABSTRACT):

En esta investigación se estudia el comportamiento del proceso de combustión propano-aire en la cámara de combustión continua Hilton ubicada en el laboratorio de Termodinámica del Departamento de Mecánica de la Universidad de Oriente, con el objetivo fundamental de simular numéricamente el proceso de combustión mediante una herramienta de Dinámica de Fluidos Computacional (ANSYS CFX 11.0). El modelo computacional está basado en las características geométricas y condiciones físicas de operación de la cámara. Discretizando el dominio del modelo con el método de discretización de volúmenes finitos. Para considerar la interacción química turbulenta, se implementó el modelo k-ε, la cinética de la reacción se estudió usando el modelo de combustión no premezclada de Disipación de Remolino. El análisis del proceso de combustión se llevó a cabo mediante la predicción de los campos de velocidad, presión y temperatura generados en la simulación numérica que brindaron características resaltantes para una mayor comprensión de este proceso que es de gran interés a nivel industrial.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Espinoza, Henry	ROL	CA	AS-X	TU	JU
	CVLAC:	4.951.779			
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Da'Silva, Carlos	ROL	CA	AS	TU	JU-X
	CVLAC:	14.503.266			
	E_MAIL	Da_silva_Carlos@HOTMAIL.COM			
	E_MAIL				
González, Yordi	ROL	CA	AS	TU	JU-X
	CVLAC:	13.368.554			
	E_MAIL	Gonzalez_Y77@HOTMAIL.COM			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	01	21
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE: SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis.Simulacion Numerica.doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: 3 meses (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniería Mecánica

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pre-Grado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Mecánica

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de trabajos de grado

"Los Trabajos de Grado propiedad exclusiva de la

Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados para

otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo

respectivo, quién lo participará al Consejo Universitario".

AUTOR 1	AUTOR 2	AUTOR 3
Jesús E. Centeno P.		

TUTOR	JURADO 1	JURADO 2
Henry Espinoza	Carlos Da'Silva	Yordy González

POR LA SUBCOMISION DE TESIS

DELIA VILLARROEL