

REPORTE DE PROYECTO INDUSTRIAL

**Simulación Numérica del Proceso de
Mezclado de Fluidos en una Cámara de
Combustión de un Motor de Propulsión**

QUE PARA OBTENER

LA ESPECIALIDAD TECNÓLOGO EN MECATRÓNICA

PRESENTA:

ING. DEMETRIO FUENTES HERNÁNDEZ

ASESORES

Dr. Carlos Amir Escalante Velázquez

Dr. Saúl Piedra González



Índice general

1. Modelo Físico y Matemático	9
1.1. Geometría	9
1.2. Modelos de Combustión y sus Principales Características	11
1.2.1. Modelo No Premezclado	17
1.2.2. Modelo Premezclado	24
1.2.3. Modelo Parcialmente Premezclado	27
2. Mallado y Condiciones de Frontera	28
2.1. Malla	28
2.2. Condiciones Iniciales	30
3. Resultados y Discusión	34
4. Conclusiones	46

Índice de figuras

1.1. Modelo 3D de la cámara de combustión.	9
1.2. Sección transversal del modelo.	10
1.3. Sección transversal modelada en el área de diseño del software de simulación.	10
1.4. Ingreso general del combustible y el oxidante.	19
1.5. Ejemplo de ingreso de compuestos combustibles y oxidantes.	19
1.6. Explicación grafica de la función de probabilidad de densidad.	21
2.1. Mallado original de la geometría.	29
2.2. Mallado final de la geometría.	29
3.1. Gráfica de fracción de mezcla de metano en el modelo no premezclado.	35
3.2. Gráfica de fracción de mezcla de metano en el modelo parcialmente premezclado.	35
3.3. Gráfica de temperatura en [K] del modelo no premezclado.	36
3.4. Gráfica de temperatura en [K] del modelo premezclado.	36
3.5. Gráfica de temperatura en [K] del modelo parcialmente premezclado.	37
3.6. Gráfica de la función PDF en el modelo parcialmente premezclado.	38
3.7. Gráfica de la función PDF en el modelo no premezclado.	38
3.8. Gráfica de presión en [Pa] del modelo no premezclado.	39
3.9. Gráfica de presión en [Pa] del modelo premezclado.	39
3.10. Gráfica de presión en [Pa] del modelo parcialmente premezclado.	40
3.11. Gráfica de velocidad en [m/s] del modelo no premezclado.	41
3.12. Gráfica de velocidad en [m/s] del modelo premezclado.	41
3.13. Gráfica de velocidad en [m/s] del modelo parcialmente premezclado.	42

3.14. Gráfica de energía cinética turbulenta en $[m^2/s^2]$ del modelo no premezclado. . .	42
3.15. Gráfica de energía cinética turbulenta en $[m^2/s^2]$ del modelo premezclado. . . .	43
3.16. Gráfica de energía cinética turbulenta en $[m^2/s^2]$ del modelo parcialmente premezclado.	43
3.17. Gráfica de velocidad de flama laminar en el modelo parcialmente premezclado.	44
3.18. Gráfica de velocidad de flama laminar en el modelo premezclado.	45

Índice de tablas

1.1. Dimensiones de la geometría.	11
1.2. Características Principales de los Modelos de Comparación.	12
2.1. Condiciones Iniciales de Simulación	31
2.2. Condiciones iniciales de simulación del modelo premezclado.	31
2.3. Condiciones de Computo	32
2.4. Condiciones de simulación numérica	32

Objetivo

El objetivo del estudio es conocer las características y capacidades de los modelos de combustión no premezclada, premezclada y parcialmente premezclada contenidos en el software de simulación ANSYS Fluent, así como indagar en los requerimientos básicos para su correcta simulación, comparar su desempeño, sentando las bases de estudios futuros en el modelado de procesos de combustión que puedan resultar de interés en procesos y aplicaciones en propulsión.

Justificación

Las múltiples aplicaciones de máquinas térmicas en procesos industriales entre las que destacan la propulsión, la generación de energía y el tratamiento y producción de materiales, han llevado a estudiar a detalle el comportamiento de la combustión. La validación de los resultados teóricos mediante la construcción de prototipos sin tener una idea concisa del comportamiento de la combustión resulta ser poco práctica para aplicaciones industriales, donde el costo de los materiales y el tiempo para desarrollar un prototipo funcional es de gran importancia para la comercialización de los productos. Con el fin de reducir el tiempo y el costo de la obtención de resultados se desarrollan múltiples herramientas entre las que destaca la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) que emplea métodos numéricos y algoritmos para simular la interacción de flujos complejos como los turbulentos para distintas aplicaciones de ingeniería y ciencia aplicada. Entre los softwares comerciales con mayor auge capaces de emplear esta herramienta computacional se encuentra ANSYS Fluent, esta herramienta de simulación permite analizar diversos comportamientos de los fluidos entre ellos la combustión, para ello cuenta con modelos específicos que simulan el comportamiento de la reacción según sea su tipo de mezclado. Para obtener resultados fiables es importante conocer las características de los modelos presentes en el software. Realizar una comparación entre los modelos de combustión permite conocer la forma en que se asemejan, las ventajas que poseen cada modelo así como las limitaciones de los mismos, permitiendo mostrar un panorama general del entorno de simulación para futuros estudios.

Introducción

La propulsión se puede definir como el movimiento resultado de una fuerza que impulsa a un cuerpo en la dirección contraria de la fuente motriz. Este impulso puede provenir de alguna fuente de energía como los fluidos de escape en un motor a reacción, la fuerza muscular al pedalear en una bicicleta, la energía nuclear producida en un reactor, la liberación de energía generada en una celda de combustible o la energía motriz transformada por un motor de combustión interna en un automóvil. Este estudio se enfoca en los fluidos involucrados en la cámara de combustión de un motor de reacción [Kumar and Rao,2013].

Un motor a reacción generalmente involucra a sistemas que incluyen una turbina de gas como, turbofanés, motores cohete, estatorreactores y pulsorreactores, este método de propulsión en aeronaves nace con fines militares, las fuerzas armadas de las distintas naciones buscan siempre estar adelante tecnológicamente que sus competidores, el desarrollo de sistemas de propulsión mediante la combustión data de principios del siglo XI pero no fue sino hasta principios del siglo XX que fue empleada para la aviación. Inicialmente se empleaban motores de combustión interna basados en pistones acoplados a hélices, pero previa y durante la segunda guerra mundial se diseñaron los primeros reactores, los cuales eran lentos y poco eficientes, entre los modelos fabricados destacan el Yokosuka MXY-7, el Coanda-1910, el Tsu-11 y el Caproni Campini N.1. Los primeros reactores difícilmente podían competir con sus contrapartes de pistones y hélice en función de costo y velocidad.

Durante la década de los treinta del siglo pasado en Inglaterra se propusieron los primeros diseños que empleaban una turbina de gas con el fin de aprovechar la energía almacenada en un combustible para generar desplazamiento, si bien la turbina de gas no era una tecnología nueva,

sus aplicaciones se vieron retardadas por la tecnología en metalurgia de la época. Distintos países (al parecer sin conocimientos previos de los trabajos realizados en Inglaterra) trabajaban a la par en sus propios turborreactores dando como resultado el primer avión de combate a reacción, el Messerschmitt Me 262 alemán. La idea de replicar la tecnología alemana fue analizada seriamente por las diversas autoridades militares (principalmente soviéticas y estadounidenses) tras la culminación de la segunda guerra mundial y ver la exitosa aplicación ideada por los alemanes.

A la fecha los turborreactores han sido mejorados al punto de que distintas aeronaves de uso militar y comercial los utilizan. El turborreactor se divide en tres secciones principales, la primera es el compresor, este permite la compresión del aire de entrada mediante de varias etapas. La segunda etapa es la cámara de combustión y es por sí misma la etapa primordial de todo el sistema, en esta etapa el aire y el combustible son mezclados y se realiza su combustión, esta etapa representa un gran reto ya que de no existir una combustión adecuada de la mezcla la eficiencia de todo el ciclo se ve afectada.

Así mismo el dosado de la mezcla es determinante en dicha combustión. Otro de los retos importantes del diseño de la cámara de combustión es la selección de materiales aplicables dadas las altas temperaturas que se encuentran presentes, en la actualidad las superaleaciones han dado paso a aplicaciones de mayor potencia al ser aplicables tanto a la cámara de combustión como a la turbina. Finalmente la tercera etapa es la turbina, donde es aprovechada la energía liberada durante la reacción exotérmica generando un impulso, la temperatura de salida de la cámara de combustión compromete a los alabes de la turbina, sin embargo además de la elección de materiales se cuenta con la circulación de aire refrigerante proveniente del exterior.

Los turborreactores han permitido alcanzar velocidades supersónicas aunque la mayoría de las aplicaciones civiles únicamente necesitan de un turbopropulsor o bien un turbofan.

El estudio y mejoramiento de los componentes de los motores de reacción, han dado como resultado motores de gran potencia como los utilizados en el Boeing 777, los PW4000-112, GE90-94B, GE90-115B y Trent 800, o los utilizados en los modelos de Airbus como el

Rolls-Royce Trent XWB, y el más avanzado a la fecha, el Sabre desarrollado por Reaction Engines que en potencia podría realizar vuelos comerciales que alcancen los 3200 kilómetros por hora aunque su intención es que sirva a la carrera espacial.

Para mejorar el proceso de combustión en la cámara es mejor inyectar directamente el combustible y generar una turbulencia en el aire de la mezcla, existen varias formas de crear esta turbulencia, ya sea por cámaras de precombustion, cámaras de turbulencia o bien desviación del flujo axial a la entrada de la cámara [Fernández, 2000].

Generalmente se emplean tres categorías para clasificar a las cámaras de combustión empleadas en sistemas de propulsión aeronáuticos, las cámaras de combustión tubulares, se caracterizan por tener una serie de subcámaras que se montan en una cámara concéntrica de mayor tamaño, este tipo cada vez es menos empleado debido a su mayor peso en comparación con los otros tipos de cámaras. Las cámaras anulares son las más empleadas en aviación y se caracterizan por tener una única cámara del mismo o muy próximo diámetro del compresor, en este tipo de cámaras se enfoca el estudio. Finalmente cámaras tuboanulares o silo son cámaras de combustión que buscan aprovechar los beneficios de los modelos anulares y tubulares generando sistemas más robustos pero cuyo mantenimiento puede complicarse [Meherwan P. Boyce, 2012].

El diseño de la cámara de combustión empleado en este estudio está basado en el propuesto por C. Priyant Mark y A.Selwyn en su estudio “Design and analysis of annular combustion chamber of a low bypass turbofan engine in a jet trainer aircraft”, así como las condiciones de frontera empleadas con el fin de implementar las simulaciones computacionales, cabe recalcar que algunos de los parámetros tanto del diseño de la cámara como de las condiciones de frontera no contenidos en el estudio de Priyant Mark y Selwyn fueron calculados a partir de los datos expresados en su estudio o bien, establecidos por el equipo de trabajo.

El contenido del estudio se describe a continuación. En primera instancia se presenta la revisión del estado del arte del tema, posteriormente se muestran las características de la cámara de combustión anular así como los modelos gráficos empleados para analizar el sistema, seguido de la presentación de los modelos de combustión presentes en el software de

simulación. Continuando con el mallado y las condiciones iniciales para las simulaciones realizadas en la versión académica de ANSYS 17.1 disponible en la sala de computo del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), finalizando con la comparación de los resultados obtenidos y las conclusiones a las que se llegó del trabajo de investigación.

Estado del Arte

Como se ha dicho con anterioridad la tecnología de la turbina de gas no es nueva pero dada la tecnología e ingeniería de materiales de la época en que fue concebida el desarrollo de aplicaciones que pudiesen utilizar este sistema se vieron mermados y retardados hasta que se contó con el desarrollo tecnológico en el área metalúrgica. Este mismo problema presento todo el sistema de motores a reacción en especial la etapa de la cámara de combustión. Dadas las altas temperaturas que resultan de la combustión de gases o combustibles líquidos fue necesario que metales con altos puntos de fusión se emplearan en un inicio y en la actualidad aleaciones y superaleaciones ricas en titanio. Si bien los materiales de construcción no son el objetivo primordial de este estudio es importante hacer mención de ello de manera contextual.

La cámara de combustión es una parte fundamental de un motor de propulsión, esta etapa es quizá la más importante del ciclo y es una de las principales razones por la cual existan numerosos estudios sobre el tema, desde los que abarcan temas como el diseño mecánico de la cámara, el método de entrada del oxidante y el combustible, el mantenimiento o innovaciones en los inyectores. Dado que el interés de este proyecto es el desarrollar simulaciones del proceso de mezclado de fluidos, estudios sobre el diseño mecánico de la cámara, el mantenimiento y su clasificación serán empleados únicamente para comprender el contexto general del tema o como punto de referencia para generar la geometría que servirá como sistema de estudio y se da mayor relevancia a estudios que priorizan el estudio del comportamiento de la combustión, el método de aplicación del combustible, propiedades del combustible y el oxidante o los modelos fisicomatemáticos que gobiernan el sistema.

Estudios previos [Vitores, 2015.][Roy, 2006.] muestran la importancia de una adecuada

combustión en la cámara resultado de una eficiente mezcla aire-combustible, reduciendo los residuos que podrían afectar el correcto funcionamiento de la maquinaria en el futuro, pues al tratarse en su mayoría de hidrocarburos los compuestos empleados como combustibles, los residuos de carbono resultantes de la combustión se incrustan en partes móviles dañando el sistema y por tanto la vida útil del mismo.

En distintos trabajos [Copete, Amell y Cadavid, 2008] priorizan otros aspectos de la cámara como son la velocidad, presión y ubicación de la inyección de combustible, parámetros importantes para cualquier simulación, puesto que son condiciones de frontera necesarias para el exitoso resultado de cualquier simulación. Así mismo este tipo de trabajos generan nuevas interrogantes acerca de cómo parametrizar el sistema en estudios futuros.

Partiendo de trabajos [Kumar y Punna, 2013.] se pueden generar geometrías que sirvan como referencia para trabajos que estudien la combustión realizada en el sistema, este reporte se apoya adicionalmente en trabajos [Priyant y Selwyn, 2016.] de donde se obtienen parámetros adicionales o complementarios que permitan mayor información antes de comenzar con el trabajo computacional.

Finalmente se consideran aportaciones [Griebel, Dornseifer y Neunhoeffler, 1998.] donde se hace hincapié sobre la metodología necesaria para la simulación.

MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

1.1. Geometría

En esta sección se presenta la geometría de cámara de combustión, dicho modelo como ya se mencionó se basa en el planteado por Kumar y Punna en el 2013, el modelado permite una mejor comprensión del diseño propuesto.

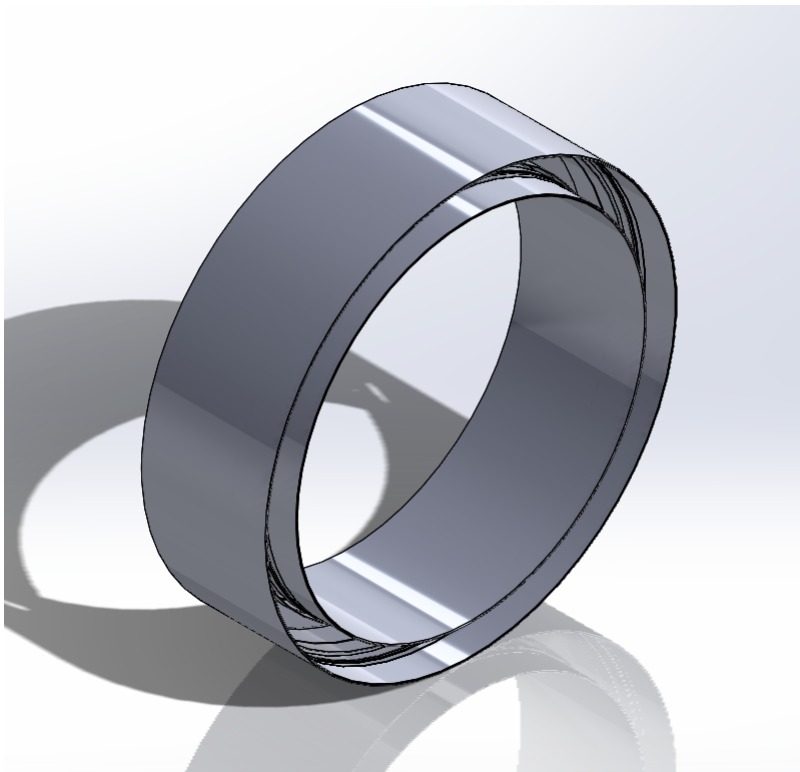


Figura 1.1: Modelo 3D de la cámara de combustión.

En la Figura 1.2 se puede apreciar un corte transversal de la cámara, donde se muestra el área de combustión, las entradas de oxidante y combustible y la salida de los gases de escape.



Figura 1.2: Sección transversal del modelo.

En color rojo se enmarca la zona primaria, en naranja la zona secundaria y en amarillo la zona de difusión.

En la Figura 1.3 se muestra la misma sección trasversal que en la Figura 1.2, pero esta vez en el área de diseño de ANSYS Fluent, este modelo en 2D es el empleado en las simulaciones.

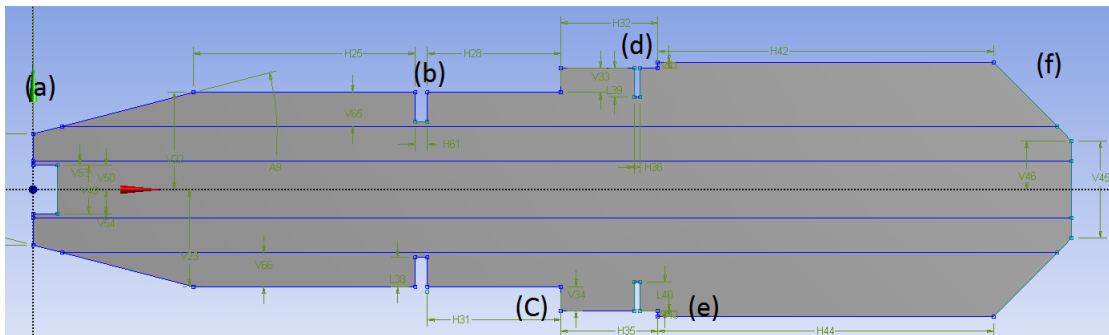


Figura 1.3: Sección transversal modelada en el área de diseño del software de simulación.

(a) Entrada de oxidante y combustible, (b) Entrada 2 de oxidante, (c) Entrada 3 de oxidante, (d) Entrada 4 de oxidante, (e) Entrada 5 de oxidante y (f) Salida de los gases de escape.

Las dimensiones del modelo empleado son tomadas del trabajo de Priyant Mark y Selwyn y son mostradas en la Tabla 1.1.

Sección	Longitud (cm)
Entrada	2.29
Longitud Total	21.9
Ancho Máximo en la Sección Primaria	5
Ancho Máximo en la Sección Secundaria	6
Ancho Máximo en la Sección de Difusión	6.2

Tabla 1.1: Dimensiones de la geometría.

1.2. Modelos de Combustión y sus Principales Características

La combustión es un proceso fisicoquímico en el cual parte de la energía almacenada en un combustible es liberada en forma de calor. De acuerdo con el nivel de mezclado molecular de los compuestos presentes en una mezcla aire-combustible se pueden clasificar como combustión no premezclada cuando la mezcla de compuestos es inexistente antes de ingresar a la cámara de combustión; premezclada cuando la mezcla presenta homogeneidad previo a su ingreso a la cámara, este proceso normalmente es realizado en una sección o etapa previa a la combustión llamada cámara de premezclado; o parcialmente premezclada si se cuenta con un grado de mezclado molecular al ingresar la mezcla a la cámara pero esta no alcanza la homogeneidad [Vitores, 2015].

Las principales características de los modelos se muestran en la Tabla 1.2.

El comportamiento de la mezcla de aire-combustible estudiada en la cámara de combustión se comporta como un flujo turbulento por lo tanto esta regido por distintos fenómenos físicos como son la conservación de masa, energía y momentum, cuyo comportamiento esta modelado mediante las siguientes ecuaciones:

Ecuación de Conservación de Masa [Copete, Amell y Cadavid, 2008]:

No Premezclado	Premezclado	Parcialmente Premezclado
<p>-El combustible y el oxidante entran por corrientes distintas.</p> <p>-Su ecuación de transporte gobernante no tiene un término fuente.</p> <p>-Se evitan las definiciones asociadas con el cierre de las velocidades medias no lineales.</p> <p>-Utiliza los modelos Steady Diffusion Flamelet (SDF) y Probability Density Function (PDF).</p> <p>-Genera ecuaciones de transporte para cada una de las fracciones.</p> <p>-En caso de existir un flujo secundario, los valores estarán en función del flujo de oxidante-combustible y las fracciones de mezcla instantáneos.</p>	<p>-La mezcla se realiza antes de la zona de combustión.</p> <p>-Es mucho más compleja de modelar que la combustión no premezclada.</p> <p>-Es muy útil para modelar la velocidad de una llama turbulenta.</p> <p>-Contiene una variable escalar que representa el progreso de la reacción de no quemado denominada c.</p>	<p>-La mezcla se realiza antes de la zona de combustión.</p> <p>-Se aplica a sistemas de combustión con mezclas no uniforme.</p> <p>-Modelan sistemas con piloto de difusión y/o chorros de aire de enfriamiento y entradas de premezcla imperfecta.</p> <p>-Incorpora tres modelos de solución (Chemical Equilibrium, Steady Diffusion Flamelet, y Flamelet Manifold).</p>

Tabla 1.2: Características Principales de los Modelos de Comparación.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \vec{u}_i) = 0 \quad (1.1)$$

Donde ρ es la densidad, x_i es la posición en el componente i y \vec{u}_i es la velocidad en dirección del componente i .

Ecuación de Conservación de Energía [ANSYS, Inc., 2013]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j j_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{V})) + S_h \quad (1.2)$$

Donde E es la energía del sistema.

Sin embargo, al tratarse al existir una reacción exotérmica la ecuación de energía debe considerar la entalpía del sistema por lo que es ajustada de la siguiente manera [Copete, Amell y Cadavid, 2008.]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \bar{h}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \vec{u}_i \bar{h}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_h} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_i} \right) + \bar{S}_h \quad (1.3)$$

Donde \bar{S}_h es el término fuente de entalpía debido a la reacción química.

Ecuación de Conservación de Momentum [Copete, Amell y Cadavid, 2008]:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \vec{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_j}(\bar{\rho} \vec{u}_i \vec{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_e \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \left(\frac{2}{3} \mu_e \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \right) \right) \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \quad (1.4)$$

Dado que es de interés incluir los efectos de la turbulencia del sistema se emplea el modelo $k-\varepsilon$, este modelo se rige por dos ecuaciones, una de energía cinética (k) [Copete, Amell y Cadavid, 2008]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1.5)$$

y otra de disipación (ε):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon G_b}) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (1.6)$$

Estas ecuaciones consideran el cambio de densidad debido a la compresibilidad de la mezcla.

Para hallar la solución de las ecuaciones que describen el fenómeno de mezclado se emplean tres ecuaciones, el teorema de transporte de Reynolds, la ecuación de conservación de momento para flujo turbulento y la ecuación de Arrhenius que permiten resolver los modelos físicos de conservación antes mencionados.

El teorema de transporte de Reynolds permite conocer la tasa de cambio de una propiedad extensiva con respecto a una propiedad intensiva, como lo sería en este caso el volumen con respecto de la densidad y esta dado por la ecuación 1.7 [Acheson, 1990].

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f(t)} \phi d\Omega = \frac{d}{dt} \int_{V_c(t)} \phi d\Omega + \int_{S_c(t)} \phi (V - V_c) \cdot n d\sigma \quad (1.7)$$

Donde ϕ es la magnitud extensiva definida por unidad de volumen, V_f es un volumen fluido, V_c es un volumen de control que coincide con V_f en un instante t , S_c la superficie de dicho volumen de control, v la velocidad del fluido y V_c la velocidad de la superficie de control.

El segundo término del miembro a la derecha de la ecuación representa la cantidad de magnitud extensiva que atraviesa la superficie de control en unidad de tiempo.

Al tratarse de un fluido newtoniano el comportamiento de la mezcla está regido por las ecuaciones de Navier-Stokes [Acheson, 1990].

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 u \quad (1.8)$$

Donde P representa la presión, u la velocidad y μ la viscosidad dinámica.

Sin embargo dado que el fenómeno real es un flujo turbulento la ecuación debe contener un término que describa esta turbulencia, por lo que la ecuación debe ser ajustada de la siguiente manera:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[2\mu (e_{ij} - \frac{\Delta \delta_{ij}}{3}) \right] \quad (1.9)$$

Donde F_i son las fuerzas aplicadas, u_i es la velocidad en el componente i , P es la presión e_{ij}

es la divergencia del sistema y δ_{ij} es la delta de Kronecker, esta ecuación es la encargada de modelar el fenómeno turbulento.

Adicionalmente a las ecuaciones que modelan el comportamiento de los elementos del sistema en un todo (como un fluido), el comportamiento químico es lo que diferencia a cada modelo de combustión, así como su respectiva manera de abordar la resolución de los fenómenos. Esto da como resultado que existan consideraciones y limitaciones específicas que caracterizan a cada uno haciéndolos más o menos aptos para diferentes aplicaciones en función de parámetros como la forma de ingresar los elementos a la cámara o bien, el recurso computacional existente.

Entre las bases teóricas de estos modelos podemos encontrar la teoría de colisiones y la ecuación de Arrhenius, que relaciona la velocidad de reacción con la temperatura, estos fundamentos teóricos proporcionan la información fisicoquímica necesaria para desarrollar modelos macroscópicos como es el caso del sistema de estudio [Connors, 1990].

$$k(T) = A \cdot e^{-\frac{Ea}{RT}} \quad (1.10)$$

Donde $k(T)$ es la constante cinética dependiente de la temperatura, A es el factor de frecuencia de colisiones, Ea es la energía de activación, R es la constante universal de los gases y T es la temperatura.

Posteriormente, se hará mención de las ecuaciones que describen los fenómenos de flujo turbulento presentes durante la combustión.

1.2.1. Modelo No Premezclado

Este modelo se caracteriza por modelar el proceso de combustión a partir de las reacciones oxido-reducción de los compuestos de las mezclas de combustible y oxidante así como a los residuos de dichas reacciones como el H_2O , y el CO_2 y sobre todo por manipular los flujos de oxidante y combustible mediante de dos corrientes de entrada distintas a diferencia de los sistemas premezclados donde la mezcla molecular se realiza antes de la combustión. Esto permite que toda la termoquímica del sistema se reduzca a fracciones de mezcla, las cuales siempre son conservativas por lo que se puede llegar a la conclusión de modelar la química como un sistema en equilibrio químico o de un ligero desequilibrio. En este modelo la química y la turbulencia del sistema se acoplan mediante una función de probabilidad de densidad (PDF) por sus siglas en inglés. Como se mencionó en la sección anterior, se deben de considerar características específicas de los modelos con el fin de obtener una simulación exitosa y antes de resolver se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La química se modela en un estado de equilibrio químico.
2. La interacción entre la turbulencia y la química se explica con una función de densidad de probabilidad asumida.
3. Se asume que el estado termoquímico está relacionado con la fracción de mezcla y se puede expresar en fracción de masa atómica.
4. En el caso del PDF supuesto, el modelo se describe mediante dos funciones matemáticas (la función doble-delta y la función beta).

5. El combustible debe de ser introducido en fracción de mezcla y en una sola entrada o varias entradas pero nunca una entrada por cada compuesto.
6. El oxidante debe de ser introducido en fracción de mezcla y en una sola o varias entradas pero nunca una entrada por cada compuesto.
7. En caso de usar como combustible un líquido o un sólido como el carbón, se debe de especificar los parámetros de volatilización y evaporación.
8. Especificar si existe recirculación del fluido de trabajo.
9. En caso de establecer un producto inerte que no afecta la fracción y permanece siempre constante, pero este producto inerte si afecta los resultados de entalpia, temperatura y densidad.
10. Solo se pueden modelar fracciones de mezcla simples.
11. Las fracciones de mezcla son asumidas de la función β .

La razón de que este modelo sea tan simple es debido a que reduce todo a fracciones de mezcla que permanecen constantes en función del combustible y el oxidante, esta fracción se obtiene de la función de fracción de mezclado.

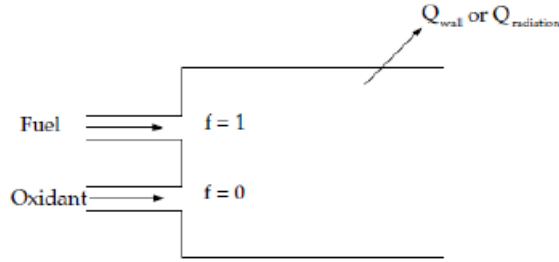


Figura 1.4: Ingreso general del combustible y el oxidante.

Fuente: ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc.

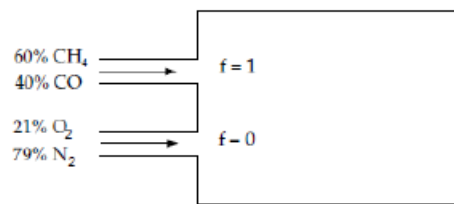


Figura 1.5: Ejemplo de ingreso de compuestos combustibles y oxidantes.

Fuente: ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc.

La función de fracción de mezclado esta definida por [Copete, Amell y Cadavid, 2008.]:

$$f = \frac{Z_i - Z_{iox}}{Z_{ifuel} - Z_{iox}} \quad (1.11)$$

Donde Z_i representa la fracción de mezcla para un elemento i , las denotaciones ox representan que la fracción corresponde a la entrada de oxidante y a su vez las denotaciones $fuel$ representan que la fracción corresponde a la entrada de combustible.

En caso de existir una corriente secundaria ya sea de combustible o de oxidante, la fracción total es la suma de las fracciones de cada corriente de combustible u oxidante [ANSYS, Inc., 2013].

$$f_{fuel} + f_{sec} + f_{ox} = 1 \quad (1.12)$$

Donde la denotación *sec* hace referencia a que se trata de la entrada secundaria.

Si bien un supuesto donde las difusividades iguales o muy similares puede ser muy complejo para flujos laminares debido a que los términos fuente de las reacciones se anulan, este supuesto es muy aceptable para flujos turbulentos debido a que la difusión molecular se ve superada por la convección turbulenta. A esto se le denomina mezcla media de Favre y es dada por la siguiente ecuación

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_l + \mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right] + S_m + S_{user} \quad (1.13)$$

Donde μ_l es la viscosidad laminar, μ_t es la viscosidad turbulenta, S_m es la transferencia de masa en la fase gaseosa por las pequeñas gotas de combustible y S_{user} es un término de origen definido por el usuario.

En adición a la solución de la ecuación anterior se resuelve una ecuación de conservación para la varianza de fracción de mezclado, permitiendo así una mejor correlación entre las interacciones de la turbulencia y la química [ANSYS, Inc., 2013].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}'^2) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}'^2) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_l + \mu_t}{\sigma_t} \right] + C_g \mu_t \cdot (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \bar{f}'^2 + S_{user} \quad (1.14)$$

Donde $f = f - \bar{f}$, $\sigma_t = 0.85$, $C_g = 2.86$ y $C_d = 2$

La PDF (ecuación 1.15) considera como varía la concentración de la fracción en el tiempo, permitiendo describir las relaciones existentes entre la fracción de mezcla, la fracción de especies, densidad y temperatura bajo la suposición de equilibrio químico.

La función PDF es abordada de dos maneras. La función doble delta (ecuación 1.16) y la función β (ecuación 1.17), la primera carece de precisión en comparación con la segunda y normalmente solo es empleada cuando el ahorro computacional es un tema muy importante a tratar, de lo contrario es una mejor elección la aplicación de la función β .

$$P(f)\Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i \quad (1.15)$$

Donde T es la escala de tiempo, τ_i es el tiempo que f espera en la banda Δf .

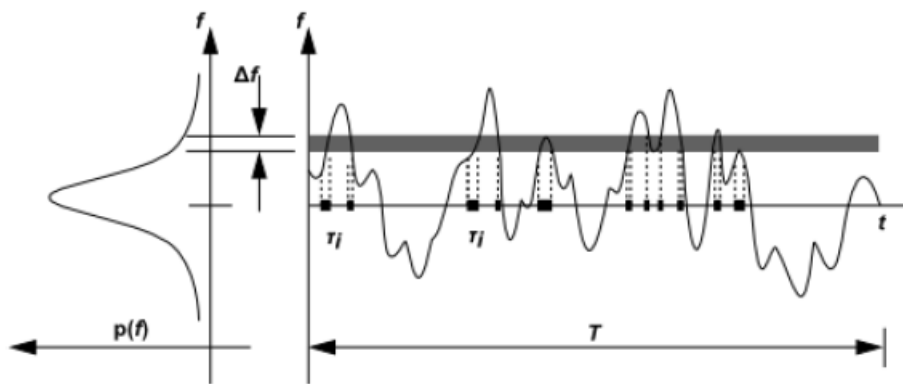


Figura 1.6: Explicación gráfica de la función de probabilidad de densidad.

Fuente: ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc.

Donde $f = 1$ o 0 .

$$P(f) = \begin{cases} 0.5, & f = \bar{f} - \sqrt{\bar{f}r^2} \\ 0.5 & f = \bar{f} + \sqrt{\bar{f}r^2} \\ 0, & elsewhere \end{cases} \quad (1.16)$$

La función β esta dada por la función.

$$\frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}} \quad (1.17)$$

Donde:

$$\alpha = \bar{f} \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right] \quad (1.18)$$

y

$$\beta = (1-\bar{f}) \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right] \quad (1.19)$$

Dado que el sistema a tratar no es un sistema adiabático, la ecuación de transporte para este sistema tiene que sufrir ajustes que permitan un mejor modelado. Es de gran importancia considerar que al tratarse de un sistema donde las pérdidas de energía no están ausentes, el equilibrio químico se ve afectado por los cambios de entalpía presentes debido a la transferencia de calor de las paredes. Para que estas condiciones se vean reflejadas en el

modelo matemático se hacen consideraciones en la ecuación de transporte por lo que los términos originales se ven afectados.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{H}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\bar{H}) = \nabla \cdot \left(\frac{k_1}{cp}\nabla\bar{H}\right) + S_h \quad (1.20)$$

Donde H es la entalpía, S_h el término fuente de transferencia de calor a las fronteras, cp el poder calorífico y k_1 el coeficiente de transferencia de calor.

1.2.2. Modelo Premezclado

Es un modelo ampliamente utilizado para modelar procesos industriales, en el modelo premezclado el combustible y el oxidante se mezclan molecularmente en una etapa previa a la ignición. La combustión de este tipo es mucho más compleja de simular que el modelo no premezclado, la razón de esto es que la combustión premezclada se manifiesta como llamas finas y alargadas moldeadas por la turbulencia existente, por lo tanto propiedades como la velocidad dependen directamente de las propiedades laminares de la llama pero también de las propiedades turbulentas de la misma, mientras que la combustión no premezclada se simplifica a solo las fracciones de mezcla que siempre son constantes. Ejemplos de fenómenos o aplicaciones de combustiones premezcladas son: motores de combustión interna, explosiones de hidrocarburos gaseosos y turbinas de gas con etapas de premezclado previas a la cámara de combustión.

Para la simulación de este modelo se deben hacer las siguientes consideraciones [ANSYS, Inc., 2013]:

1. En el modelo Premezclado se parte del estado de equilibrio químico.
2. Debe de ser utilizado el solucionador basado en presión.
3. El modelo solo es válido para fluidos subsónicos turbulentos.
4. No puede utilizarse conjuntamente con el modelo de contaminantes.
5. No se pueden utilizar partículas de fase discreta.

La propagación de la llama resultado de la combustión se modela resolviendo la ecuación de transporte para la media de densidad de progreso de reacción representada por \bar{c} [[ANSYS, Inc., 2013].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{c}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\bar{c}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \nabla \bar{c} \right) + \rho S_c \quad (1.21)$$

Donde Sc_t es el número de turbulencia de Schmidt y S_c es el termino fuente de progreso de reacción [ANSYS, Inc., 2013].

$$c = \frac{\sum_k a_k (Y_k - Y_k^u)}{\sum_k a_k Y_k^{eq}} = \frac{Y_c}{Y_c^{eq}} \quad (1.22)$$

Donde a_k es igual a 0 para reactivos y 1 para los productos, u son los reactivos no quemados, Y_k denota la fracción de masa de especies y eq representa el equilibrio químico.

En caso de que el sistema sea adiabático se supone que la temperatura actúe como una función lineal entre la temperatura más baja de mezcla sin quemar T_u y la más alta que si se ha logrado quemar T_{ad}

Ecuación de Energía para un Sistema Adiabático [ANSYS Inc., 2013.]:

$$T = (1 - c)T_u + cT_{ad} \quad (1.23)$$

Dados los cambios en la entalpía resultado de las reacciones exotérmicas, se resuelve la ecuación de conservación de energía en función de la entalpía para los sistemas que no son adiabáticos.

Ecuación de Energía para un Sistema No Adiabático [ANSYS Inc., 2013.]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} h) = \nabla \cdot \left(\frac{k + k_1}{c_p} \nabla h \right) + S_{h,chem} + S_{h,rad} \quad (1.24)$$

Donde $S_{h,chem}$ representa las ganancias de energía durante la reacción química y $S_{h,rad}$ representa las pérdidas de energía durante la reacción.

1.2.3. Modelo Parcialmente Premezclado

Este modelo está basado en los modelos previos de combustión no premezclada y premezclada, entre sus aplicaciones se pueden encontrar sistemas donde el oxidante y el combustible no tiene una mezcla uniforme o bien sistemas donde la entrada de mezcla es imperfecta. El modelo utiliza como condiciones de entrada similares al modelo premezclado donde los compuestos son mezclados molecularmente antes de la ignición pero con la virtud de simplificar el modelo a solo mezclas. Se parte de todas las suposiciones marcadas para el modelo no premezclado y mezclado así como de sus ecuaciones de transporte. Adicionalmente se resuelven las ecuaciones de energía específicas para este modelo. Las consideraciones a tener en cuenta son todas las de los modelo premezclado y no premezclado, adicionalmente hay que incluir las siguientes consideraciones:

1. Posee todas las limitaciones de los modelos no premezclado y premezclado.
2. Está limitado a dos corrientes de entrada.
3. Puede extenderse a tres corrientes pero incurre en un cálculo computacional mucho mayor.

En el modelo parcialmente premezclado una variable a considerar es la fracción de masa de especies, por lo que la ecuación de energía está dada por la ecuación 1.25 para un sistema adiabático y por la ecuación 1.26 para un sistema no adiabático [ANSYS Inc., 2013].

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial c} \omega_c = \rho X_c \frac{\partial^2 T}{\partial c^2} - \frac{1}{c_p} \sum_k h_k \omega_k + \rho \frac{X_c}{c_p} \left(\frac{\partial c_p}{\partial c} + \sum_k c_{p,k} \frac{\partial Y_k}{\partial c} \right) \frac{\partial T}{\partial c} \quad (1.25)$$

Donde w_k es la tasa de reacción de las especies, h_k es la entalpía total.

MALLADO Y CONDICIONES DE FRONTERA

2.1. Malla

En esta sección se describe el diseño de la malla realizado a partir de la geometría de la Figura 1.3. El diseño de la malla parte del mallado simple que genera por omisión el mallador de ANSYS Fluent, dado que se espera que los efectos propios de las reacciones oxido-reducción se realicen al centro de la geometría debido a que es en esta zona donde se encuentra la entrada de combustible que a su vez se mezclará con los flujos de oxidante, para ello se refina la sección central de la geometría con el fin de obtener mayor precisión en los resultados. Considerando que los efectos causados por la capa límite se harán presentes en las paredes de la cámara de combustión, esta sección recibe adecuaciones que permiten incrementar el número de elementos de menor tamaño en comparación con el resto del mallado que no recibe algún refinamiento, de esta manera al igual que al hacer un refinamiento en la sección central se mejora la precisión de los resultados adquiridos de la simulación. En la Figura 2.1 se puede apreciar la malla original donde aún no se realizaban las modificaciones de refinado en las secciones donde se presentan los fenómenos de interés del sistema.

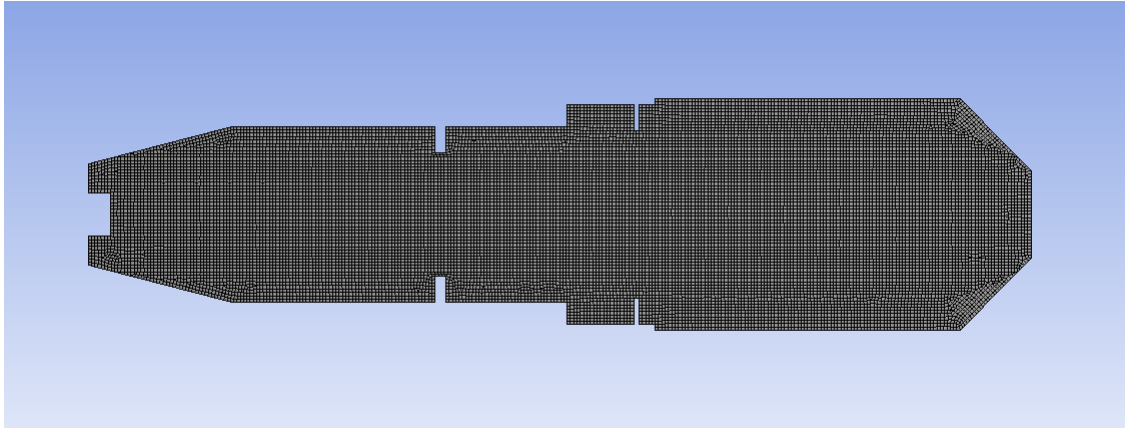


Figura 2.1: Mallado original de la geometría.

En contraparte la Figura 2.2 muestra la malla empleada para las simulaciones donde el refinamiento se aprecia con claridad en la sección central y en los bordes del modelo. El mallado final da como resultado 151638 nodos y 148135 elementos cuadriláteros repartidos principalmente en las zonas con refinamiento.

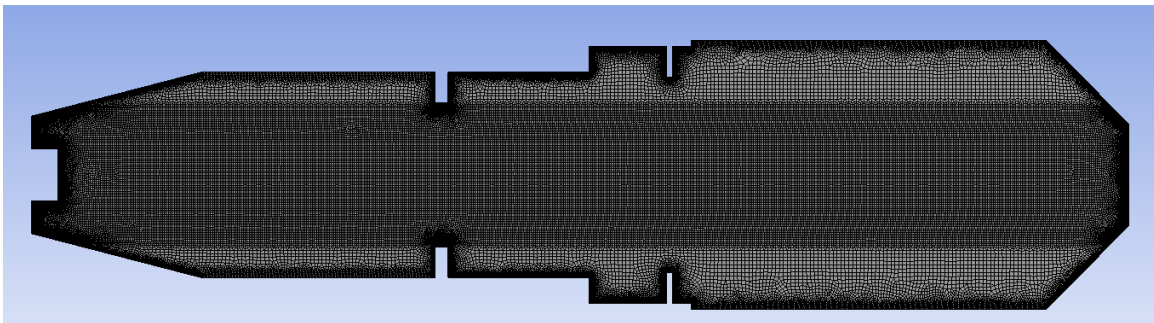


Figura 2.2: Mallado final de la geometría.

Sin duda el diseño de la malla forma parte primordial de la simulación CFD, para generar un mallado apropiado es necesario realizar modificaciones al mallado original proporcionado por el mallador del software, para realizar dichas modificaciones se requiere tener claro el proceso a simular, la escala y exactitud deseada del fenómeno a simular.

2.2. Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales para los tres modelos fueron las mismas con las excepciones propias de cada modelo, ejemplo de ello es que en el modelo no premezclado se requiere agregar los elementos oxidantes y los combustibles para crear una mezcla e indicar en el software zona de entrada de dicha mezcla a quemar (combustible) y cual es entrada de oxidante mediante la indicación de fracción de mezclado, habiendo calculado de manera previa la función PDF. En el caso del modelo premezclado es necesario agregar manualmente los compuestos de combustible y oxidante desde la base de datos que posee el software con el fin de que pueda generar la mezcla antes de realizar la ignición, con la ventaja de que al existir una única entrada al sistema este caso, no es necesario indicar cual es entrada de combustible y cual es de oxidante. Finalmente el modelo parcialmente premezclado de la misma manera que el modelo premezclado requiere de introducción manual del combustible y el oxidante pero si requiere establecer las fracciones de mezcla al igual que el modelo no premezclado.

En la Tabla 2.1 se muestran las condiciones iniciales de simulación utilizadas para los modelos parcialmente premezclado y no premezclado, dado que en el modelo premezclado requiere que a la entrada del sistema el combustible y el oxidante sea una mezcla, las condiciones iniciales se muestran en la Tabla 2.2.

Condición	
Combustible (COM)	Metano
Oxidante (OX)	Oxigeno
Vel. OX. en la Entrada (a)	20 m/s
Vel. OX. en la Entrada (b)	30 m/s
Vel. OX. en la Entrada (c)	20 m/s
Vel. OX. en la Entrada (d)	20 m/s
Vel. OX. en la Entrada (e)	40 m/s
Vel. COM.	400 m/s
Presión de Entrada	3 MPa

Tabla 2.1: Condiciones Iniciales de Simulación

Para las entradas (a), (b), (c), (d) y (e) ver Figura 1.3.

En la Tabla 2.1 se muestran las condiciones iniciales de simulación utilizadas para los modelos parcialmente premezclado y no premezclado, dado que en el modelo premezclado requiere que a la entrada del sistema el combustible y el oxidante sea una mezcla, las condiciones iniciales se muestran en la Tabla 2.2.

Condición	
Combustible (COM)	Metano
Oxidante (OX)	Oxigeno
Vel. Mezcla OX-COM en la Entrada (a)	400 m/s
Presión de Entrada	3 MPa

Tabla 2.2: Condiciones iniciales de simulación del modelo premezclado.

La Tabla 2.3 muestra las características del equipo de computo empleado para realizar las

simulaciones de los modelos de combustión

Condición	
Modelo PC	ThinkStation
Sistema Operativo	Windows 8.1 Enterprise
Procesador	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2609 v3 1.9 GHz
Memoria RAM	32 GB (31.9 usable)
Tiempo Aproximado de Cómputo	50 Min. Aprox.

Tabla 2.3: Condiciones de Computo

Condición	
Simulador	Basado en Presión
Modelo de Turbulencia	k-epsilon
Modelos	Premezclado, No Premezclado y Parcialmente Premezclado
	No Adiabático
	Partiendo del Equilibrio Químico

Tabla 2.4: Condiciones de simulación numérica

En la Tabla 2.4 se muestran las condiciones aplicadas para la solución numérica en ANSYS Fluent, en ella se pueden apreciar los modelos de combustión empleados para la implementación de las simulaciones, el estado químico del que se parte así como al tener un estado no adiabático se emplea automáticamente el modelo de energía. Las simulaciones de los

modelos se realizaron empleando el solucionador basado en presión dado que es el único solucionador capaz de resolver todos los modelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones, se comparan las gráficas de las variables de relevancia como son la temperatura, fracción de mezcla de metano en los modelos parcialmente premezclado y no premezclado, energía cinética turbulenta, densidad, velocidad de flama laminar para los modelos premezclado y parcialmente premezclado y la variable PDF para los modelos no premezclado y parcialmente premezclado.

Lo primero que hay que hacer al obtener resultados de las simulaciones es asegurarse de que el combustible está ingresando a la cámara de combustión, en la Figura 3.1 correspondiente al modelo no premezclado y la Figura 3.2 del modelo parcialmente premezclado se aprecia el estado de la fracción de metano a su ingreso a la cámara. El seguimiento de la fracción de metano se puede monitorear graficando la fracción de mezcla de metano de la sección de especies presente en los modelos no premezclado y parcialmente premezclado.

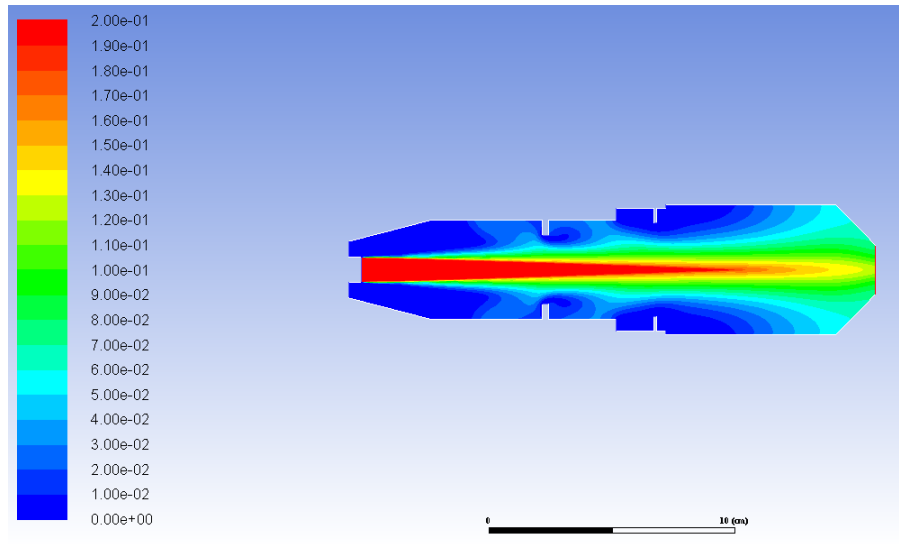


Figura 3.1: Gráfica de fracción de mezcla de metano en el modelo no premezclado.

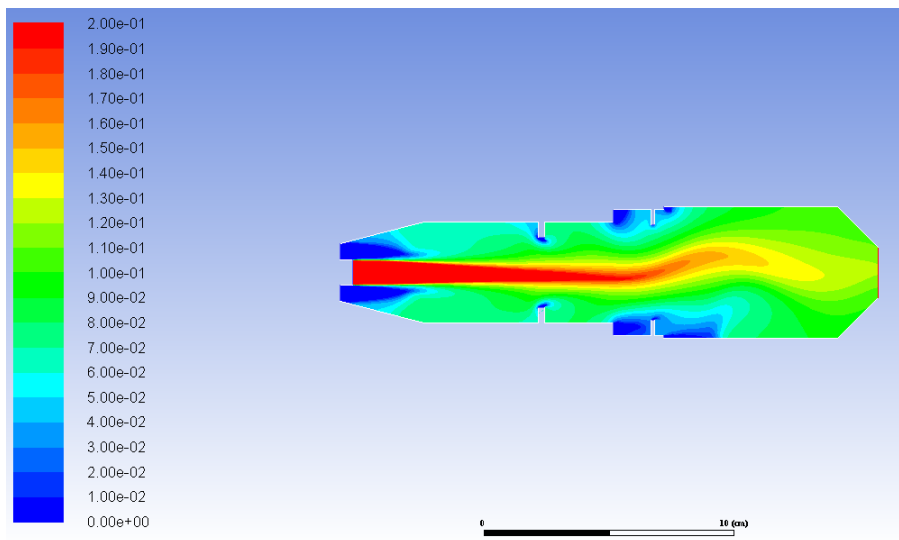


Figura 3.2: Gráfica de fracción de mezcla de metano en el modelo parcialmente premezclado.

Comparando la Figura 3.1 donde se muestra el campo para el modelo no premezclado, con la Figura 3.2 donde se muestra el campo para el modelo parcialmente premezclado, se puede apreciar que a la cámara ingresa la misma cantidad de metano, sin embargo dado el nivel de mezclado de la sustancias del modelo parcialmente premezclado el metano se propaga de mejor manera por la cámara.

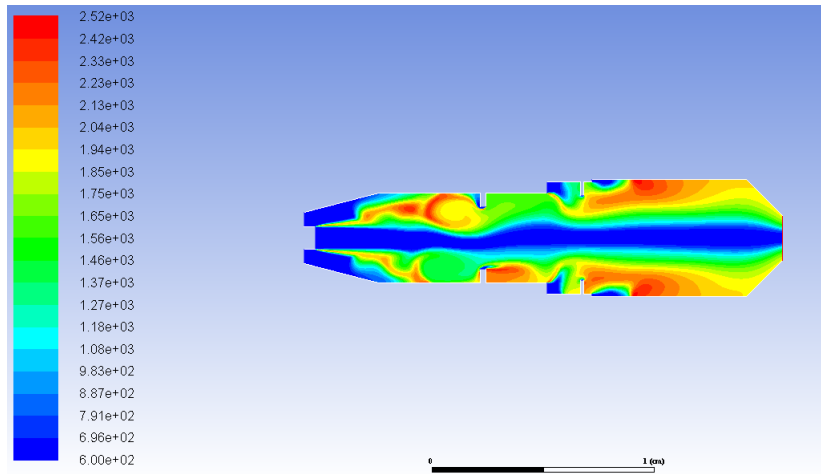


Figura 3.3: Gráfica de temperatura en [K] del modelo no premezclado.

En la Figura 3.4 se muestra el campo de temperatura obtenido de la simulación numérica para el modelo premezclado, esta variable es de gran importancia pues muestra los el incremento de magnitud ocasionado por la liberación de energía de la reacción tras la ignición del combustible.

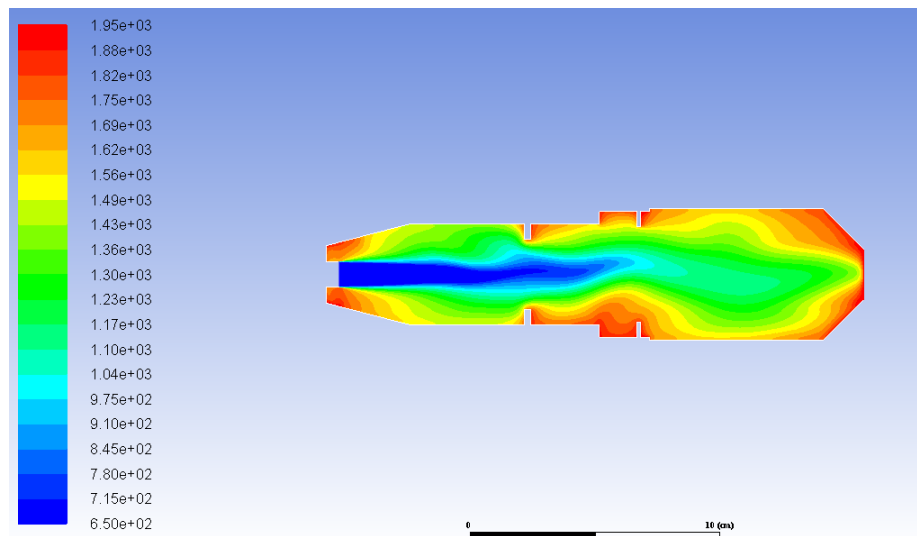


Figura 3.4: Gráfica de temperatura en [K] del modelo premezclado.

comparando la Figura 3.3 resultado de la simulación del modelo no premezclado contra la Figura 3.5 resultado del modelo parcialmente premezclado, podemos observar que los campos son muy similares pues ambos fenómenos cuentan con entradas adicionales de oxidante (Ver Figura 1.3) incluso es apreciable que las reacciones continúan a lo largo de la geometría debido a esta condición. Por el contrario en el campo de temperatura del modelo premezclado mostrado en la Figura 3.4 se puede apreciar que a causa de la modificación de esta geometría donde únicamente se cuenta con una entrada donde el combustible y el oxidante ya se encuentran en una mezcla molecular, las reacciones se llevan a cabo únicamente en la sección central del modelo, propagando la energía resultante de la reacción hacia los límites de la cámara.

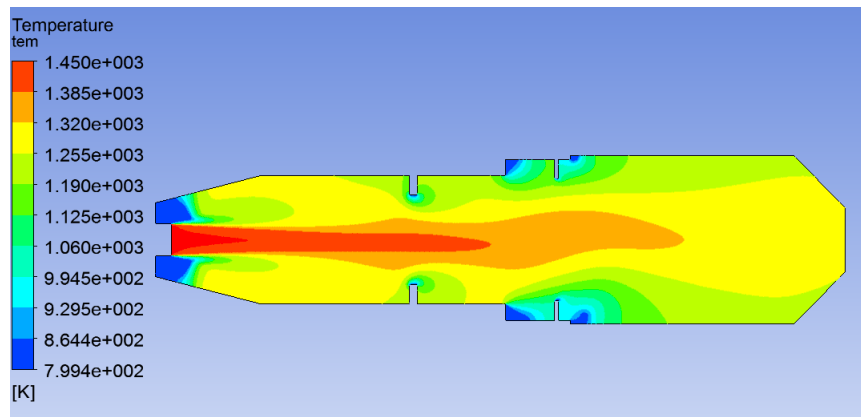


Figura 3.5: Gráfica de temperatura en [K] del modelo parcialmente premezclado.

Como se puede apreciar, los resultados de las simulaciones se encuentran en el mismo orden de magnitud que sistemas observables en aplicaciones aeronáuticas.

De igual manera se puede recurrir a la opción de monitoreo de la variable PDF como se muestra en la Figura 3.6 y la figura 3.7, presente en ambos modelos debido a que esta función permite monitorear el estado de fracción mezcla en función del tiempo.

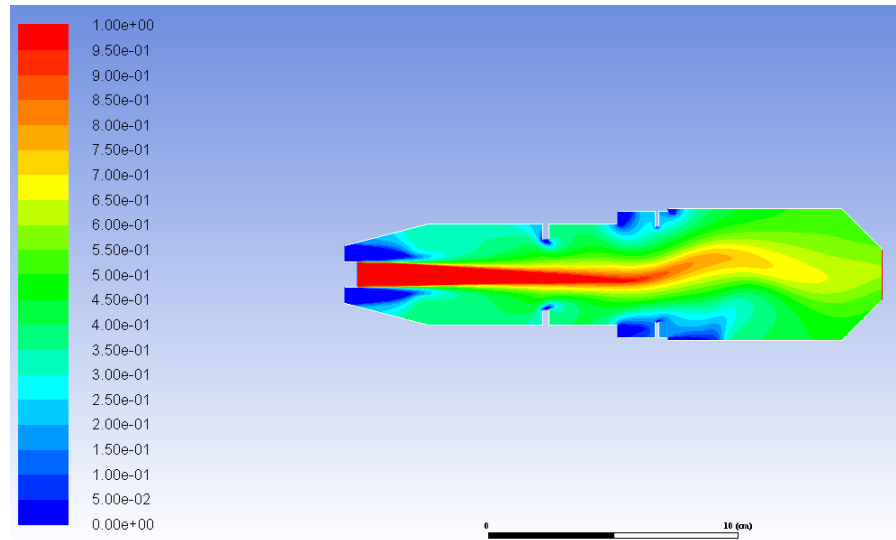


Figura 3.6: Gráfica de la función PDF en el modelo parcialmente premezclado.

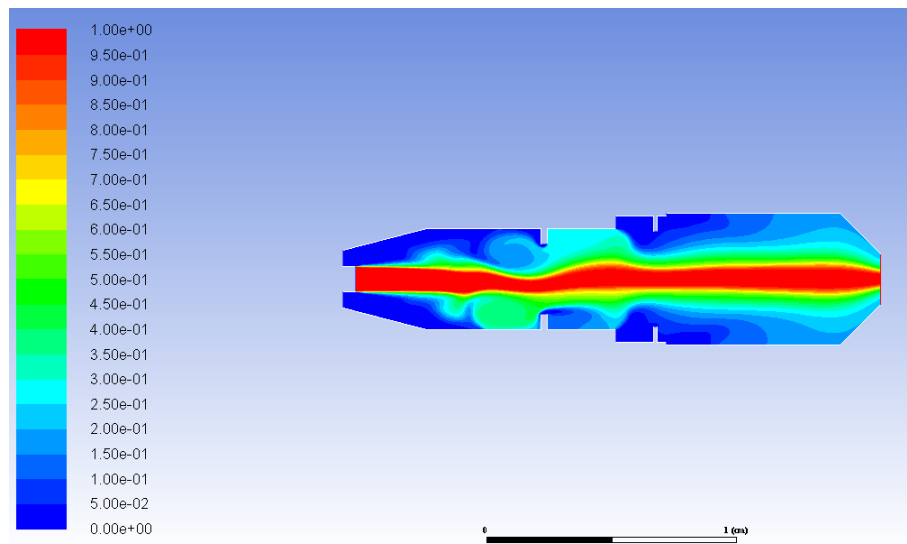


Figura 3.7: Gráfica de la función PDF en el modelo no premezclado.

Comparando los tres modelos, la presión se encuentra del mismo orden de magnitud. La presión es un parámetro a considerar ya que al utilizar un combustible gaseoso este cambia algunas de sus propiedades como la densidad por efecto de la presión.

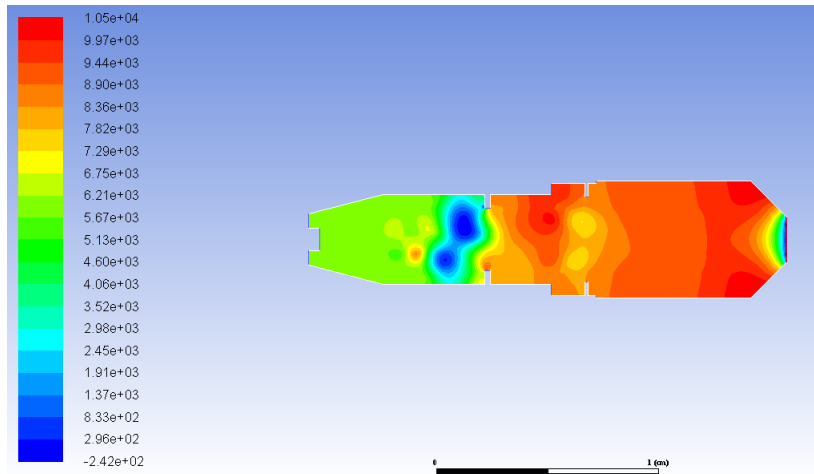


Figura 3.8: Gráfica de presión en [Pa] del modelo no premezclado.

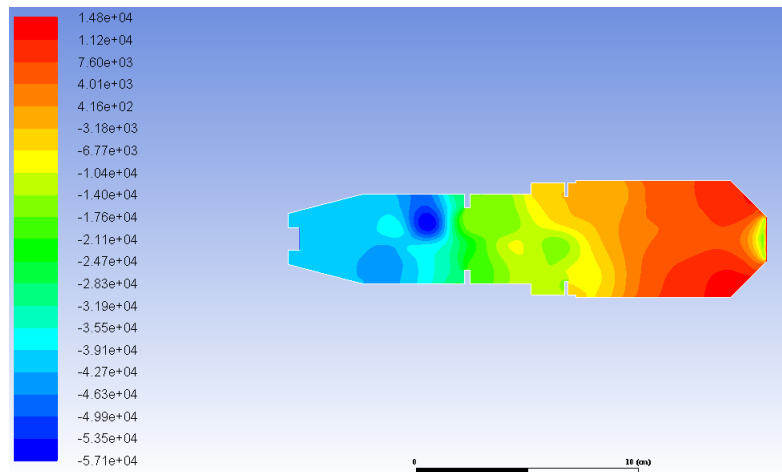


Figura 3.9: Gráfica de presión en [Pa] del modelo premezclado.

En la Figura 3.8 se muestra el campo de presión para el modelo no premezclado, mientras que en la Figura 3.9 aparece el campo de presión del modelo premezclado, si comparamos ambas imágenes con la Figura 3.10 del campo de presión para el modelo parcialmente premezclado se puede observar que los primeros no poseen la misma uniformidad de presión a lo largo de la cámara aunque no es claro el por qué.

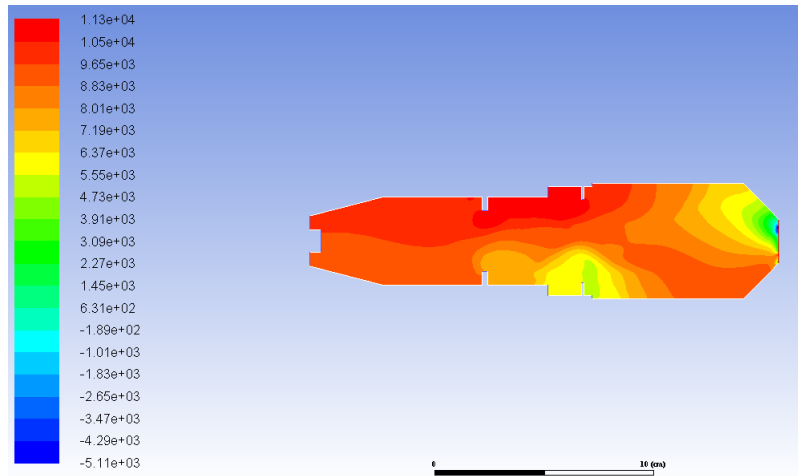


Figura 3.10: Gráfica de presión en [Pa] del modelo parcialmente premezclado.

La presión debe considerarse siempre que el combustible de la reacción sea gaseoso, en el caso de que el combustible sea líquido o sólido el efecto de la presión puede despreciarse, pero no así la relación de compresión existente en el sistema.

En la Figura 3.11 se grafica la velocidad en el modelo no premezclado, comparada con la Figura 3.12 y la Figura 3.13 se observa que la velocidad de entrada del combustible es igual en cada una de ellas, la velocidad de salida varía ligeramente, sin embargo se encuentra en el mismo orden de magnitud así mismo hay que recalcar que el hecho de que la velocidad de salida se alta es lo se busca en aplicaciones de propulsión.

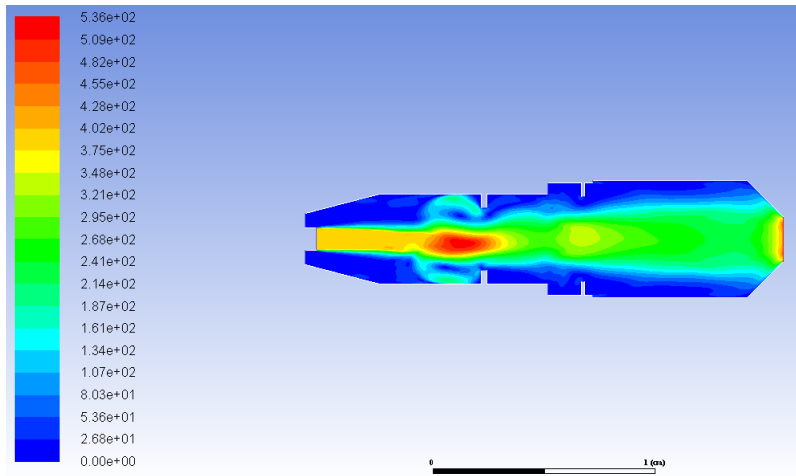


Figura 3.11: Gráfica de velocidad en [m/s] del modelo no premezclado.

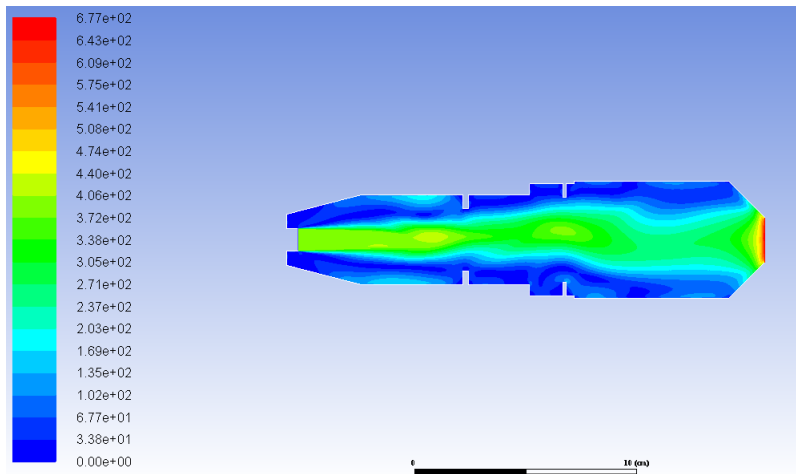


Figura 3.12: Gráfica de velocidad en [m/s] del modelo premezclado.

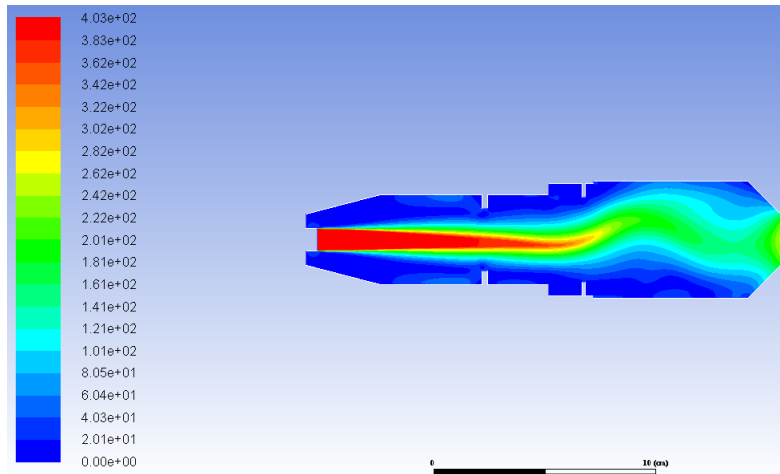


Figura 3.13: Gráfica de velocidad en [m/s] del modelo parcialmente premezclado.

Debido a que el flujo se comporta como un flujo turbulento es conveniente monitorear la energía cinética turbulenta (k) del sistema, si bien en se puede observar que en los resultados de los tres modelos la variable k se presenta en el mismo orden de magnitud, en la Figura 3.14 perteneciente al modelo no premezclado, se aprecia que al existir cambios en la geometría la energía cinética sufre un incremento probablemente debido al incremento de velocidad consecuencia de la reducción de área por donde circula el flujo.

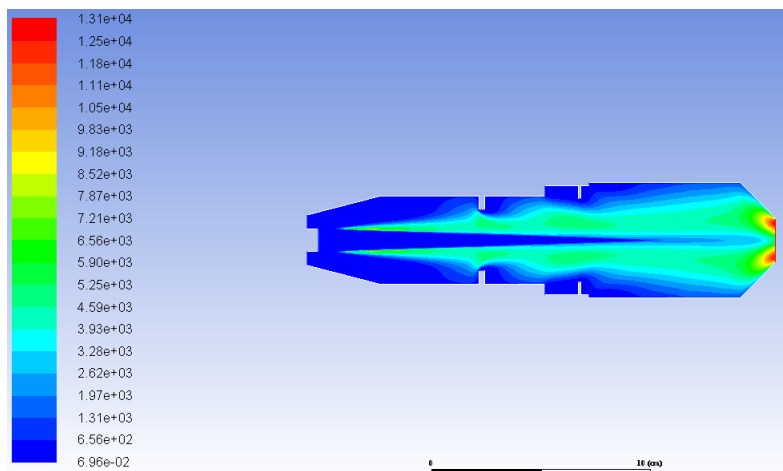


Figura 3.14: Gráfica de energía cinética turbulenta en $[m^2/s^2]$ del modelo no premezclado.

De igual manera haciendo una comparación con la Figura 3.16 del modelo parcialmente

premezclado, donde existe un incremento promedio de del valor de k y la Figura 3.15 del modelo premezclado, donde el incremento es aún mayor, se puede concluir que la energía cinética turbulenta del sistema está relacionado con el nivel de mezclado molecular de las sustancias presentes en la cámara.

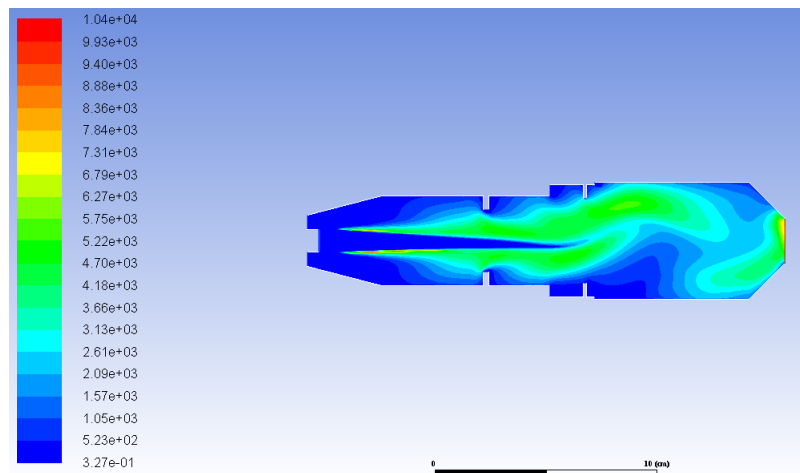


Figura 3.15: Gráfica de energía cinética turbulenta en $[m^2/s^2]$ del modelo premezclado.

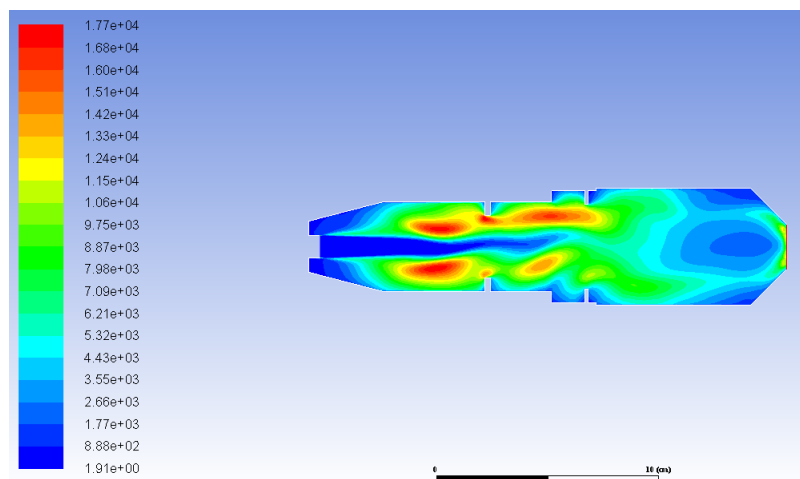


Figura 3.16: Gráfica de energía cinética turbulenta en $[m^2/s^2]$ del modelo parcialmente premezclado.

La posibilidad de monitorear el comportamiento de la velocidad laminar de la flama está presente únicamente en el modelo premezclado y parcialmente premezclado, en la Figura 3.17

perteneciente al modelo parcialmente premezclado se aprecia que a cada entrada de oxidante el inicio de la flama siempre es laminar, esta herramienta resulta muy útil cuando es de importancia seguir el comportamiento de llamas delgadas. Esta herramienta no es especialmente relevante para esta aplicación, sin embargo es pertinente mostrar la capacidad del modelo de combustión para otras posibles aplicaciones.

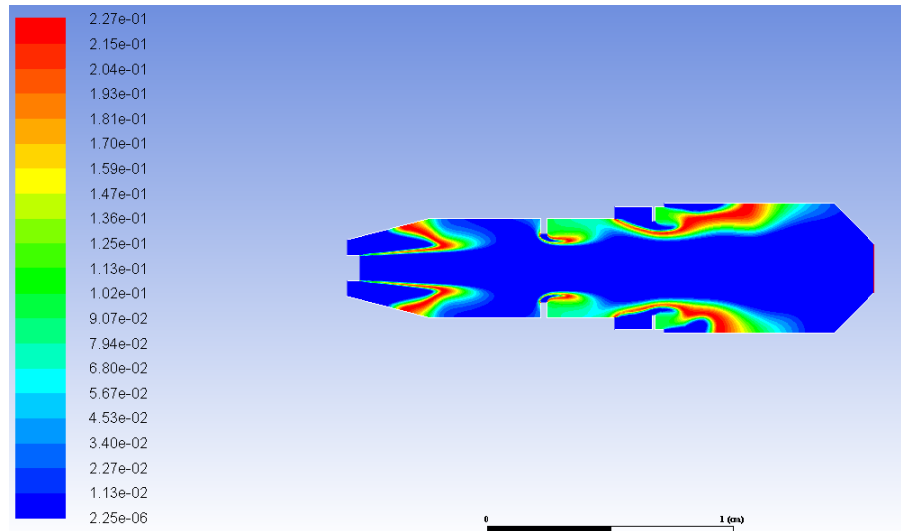


Figura 3.17: Gráfica de velocidad de flama laminar en el modelo parcialmente premezclado.

Por otra parte en la Figura 3.18 se muestra el comportamiento de una flama en el modelo premezclado donde al existir una única entrada de mezcla oxidante-reductora la flama se comporta de manera más uniforme a lo largo de la geometría.

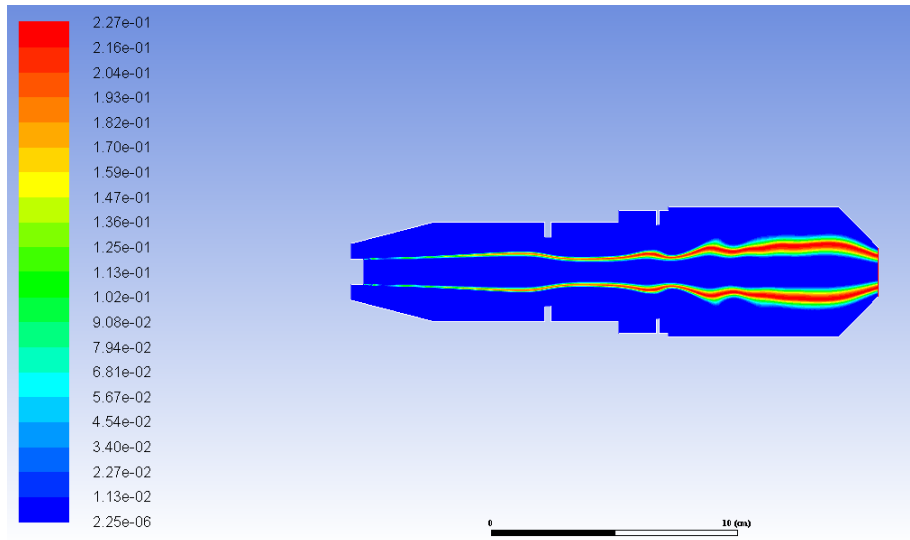


Figura 3.18: Gráfica de velocidad de flama laminar en el modelo premezclado.

CONCLUSIONES

1. Se concluye dados los resultados obtenidos del análisis y comparación de los modelos de combustión que al seleccionar un modelo de combustión para su implementación en procesos de propulsión o cualquier otra aplicación, se debe de tener claro cuáles son las variables que se desean monitorear pues si bien existen parámetros que se pueden obtener en los tres modelos tales como la velocidad, presión, densidad o temperatura, existen variables a las cuales son únicamente accesibles mediante modelos específicos. Ejemplo de ello es la posibilidad de seguir el comportamiento en función del tiempo mediante las fracciones de mezcla y la función PDF, del combustible y/o el oxidante en los modelos premezclado y parcialmente premezclado o bien conocer el comportamiento de las flamas finas y tener mayor control sobre la mezcla a combustionar mediante el modelo de combustión premezclado.
2. El modelo parcialmente premezclado al compartir características de los modelos no premezclado y premezclado permite observar las variables presentes en ambos modelos, sin embargo, el costo computacional resulta mayor, mientras tanto el modelo premezclado es el modelo que menos costo computacional tiene pero es más complejo de simular.
3. Dada la complejidad del fenómeno de la combustión se requiere la validación de los resultados obtenidos de las simulaciones mediante la experimentación y/u otros softwares de simulación, así mismo se requiere estudiar el comportamiento de los modelos con diferentes combustibles de los cuales se puedan trabajar aspectos como el dosado y las fracciones de mezcla.

Bibliografía

- [1] GLASSMAN IRVING, RICHARD A. and GLUMAC NICK G., *Combustion* 5th edition, Elsevier, Netherlands, 2015.
- [2] PHILIP G. HILL and CARL R. PETERSON, *Mechanics and Thermodynamics of Propulsion* Second Edition, Addison-Wesley, USA, 1992.
- [3] GABRIEL D. ROY, *Combustion Processes in Propulsion*, Elsevier, Netherlands, 2006.
- [4] MEHERWAN P. BOYCE, *Gas Turbine Engineering Handbook*, 4th Edition, Elsevier, Netherlands, 2012.
- [5] C. PRIYANTMARKA, and A.SELWYN *Design and analysis of annular combustion chamber of a low bypass turbofan engine in a jet trainer aircraft*, Elsevier, Netherlands, 2016.
- [6] P.SRAVAN KUMAR, and P.PUNNA RAO *Design and Analysis of Gas Turbine Combustion Chamber*, International Journal Of Computational Engineering Research, India, 2013.

- [7] I. MARTINEZ, *Basic and Applied Thermodynamics*, Dossat, Spain, 2000.
- [8] HENRY COPETE, ANDRÉS AMELL and FRANCISCO CADAVID, *Numerical Simulation of High Speed Combustion Chamber Using Two Fuel Injection Configurations* Dyna, Colombia, 2008.
- [9] ANSYS, INC. *ANSYS Fluent Theory Guide*, ANSYS, Inc., USA, 2013.
- [10] J. VITORES PÉREZ *La Cinética de la Combustión de Metano*, Universidad Carlos III de Madrid, Spain, 2015.
- [11] CARLOS SÁNCHEZ TARIFA *Motores de Reacción*, Revista de Aeronáutica, Colombia, 1963.
- [12] INCROPERA, DEWITT, BERGMAN and LAVINE, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Sixth Edition, Wiley, USA, 2012.
- [13] STEPHEN B. POPE *Turbulent Flows*, Cambridge University Press, UK, 2000.
- [14] ACHESON, D. J. *Elementary Fluid Dynamics*, *Oxford Applied Mathematics and Computing Science Series*, Oxford University Press, UK, 1990.
- [15] KENNETH CONNORS, *Chemical Kinetics*, VCH Publishers, 1990.

- [16] MICHAEL GRIEBEL, THOMAS DORNSEIFER and TILMAN NEUNHOEFFER, *Numerical Simulation in Fluid Dynamics: A Partial Introduction*, Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, 1998.
- [17] H.K. VERSTEEG and W. MALALASEKERA, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method*, Longman Scientific and Technical, USA, 1995.
- [18] PEDRO FERNÁNDEZ DÍEZ, *Libro Sobre Ingeniería Energética*, Universidad de Cantabria, Spain, 2000.