



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:**

---

**“ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN DE UN QUEMADOR DE GAS TIPO  
VENTURI CON PREMEZCLA DEL LABORATORIO DE ENERGÍA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA UTILIZANDO  
SIMULACIÓN CFD MEDIANTE EL SOFTWARE ANSYS FLUENT”**

---

**AUTOR:** Jefferson Xavier Quinga Hernández

**TUTOR:** Ing. Mg. Santiago Paúl Cabrera Anda

**AMBATO - ECUADOR**

**Abril - 2021**

## **CERTIFICACIÓN**

En calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema **“ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN DE UN QUEMADOR DE GAS TIPO VENTURI CON PREMEZCLA DEL LABORATORIO DE ENERGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA UTILIZANDO SIMULACIÓN CFD MEDIANTE EL SOFTWARE ANSYS FLUENT”**, elaborado por el señor Jefferson Xavier Quinga Hernández, portador de la cédula 1804731576, estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, Marzo 2021

---

**Ing. Mg. Santiago Paúl Cabrera Anda**

**TUTOR**

## **AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

Yo, **Jefferson Xavier Quinga Hernández**, con C.I. 1804731576 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Trabajo Experimental con el tema: **“ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN DE UN QUEMADOR DE GAS TIPO VENTURI CON PREMEZCLA DEL LABORATORIO DE ENERGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA UTILIZANDO SIMULACIÓN CFD MEDIANTE EL SOFTWARE ANSYS FLUENT”**, así como también gráficos, simulaciones, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, Marzo 2021



---

**Jefferson Xavier Quinga Hernández**

**C. I.: 1804731576**

**AUTOR**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, Marzo 2021



---

**Jefferson Xavier Quinga Hernández**

**C. I.: 1804731576**

**AUTOR**

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO**

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por el estudiante Jefferson Xavier Quinga Hernández de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **“ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN DE UN QUEMADOR DE GAS TIPO VENTURI CON PREMEZCLA DEL LABORATORIO DE ENERGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA UTILIZANDO SIMULACIÓN CFD MEDIANTE EL SOFTWARE ANSYS FLUENT”**.

Ambato, Marzo 2021

Para constancia firman.

---

**Ing. Mg. Diego Fernando Núñez Núñez**

**Miembro Calificador**

---

**Ing. Mg. Luis Eduardo Escobar Luna**

**Miembro Calificador**

## **DEDICATORIA**

Este proyecto va dedicado en primer lugar a mi Dios, que en estos momentos tan difíciles ha brindado salud, comida y bienestar a mi familia y personas allegadas, para con su apoyo poder desarrollar el mismo.

A la memoria de mi abuelo materno, a mi madre y abuela quienes fueron pilares fundamentales con su apoyo incondicional en toda mi vida universitaria inculcándome valores y principios, y a toda mi familia que de una a otra manera me apoyaron en cada momento en los que los necesité.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la sabiduría y salud para poder conseguir cada una de mis metas, agradezco a mi madre y abuela por su apoyo incondicional al igual que el resto de mi familia que pusieron su granito de arena para culminar este trabajo.

Al Ing. Mg. Santiago Cabrera por proporcionar sus conocimientos en el desarrollo de este proyecto, por la paciencia y el tiempo empleado para poder dar por culminado este proyecto.

A los docentes quienes me ayudaron proporcionándome sus bastos conocimientos y experiencias para poder crecer en el día a día.

A mis amigos con quienes conviví el día a día que se convirtieron en un gran apoyo y de quienes me llevo muy gratos recuerdos.

## ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN .....	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	iii
DERECHOS DE AUTOR .....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
NOMENCLATURA .....	xv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Tema .....	1
1.2. Justificación .....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Antecedentes Investigativos.....	3
1.5 Fundamentación teórica .....	5
1.5.1 Termodinámica .....	5
1.5.1.1 Primera ley de la termodinámica.....	5
1.5.1.2 Segunda ley de la termodinámica .....	5
1.5.1.3 Tercera ley de la termodinámica.....	6
1.5.1.4 Mezcla de gases .....	6
1.5.1.1 Mezclador adiabático .....	7
1.5.2 Transferencia de calor.....	7
1.5.3 Combustión.....	8
1.5.2.1 Tipos de combustión .....	9
1.5.2.1.1 Combustión completa .....	9
1.5.2.1.2 Combustión incompleta .....	10
1.5.2.1.3 Aire .....	11
1.5.2.2 Temperatura en la combustión.....	11
1.5.2.3 Tipos de llama en la combustión.....	12
1.5.3 Quemador.....	13



1.5.3.1 Partes de un quemador de gas .....	14
1.5.4 Combustibles.....	15
1.5.4.1 Gas licuado de petróleo.....	15
1.5.5. Dinámica de fluidos computacional.....	16
1.5.5.1 Mallado .....	17
1.5.5.2 Métrica de malla Skewness.....	19
1.5.5.3 Método de volúmenes finitos .....	19
1.5.5.4 ANSYS FLUENT .....	20
1.5.5.5 Modelado del transporte de especies y la química de tasa finita. ....	22
1.5.5.5.2 Modelo Parcialmente Premezclado.....	22
CAPÍTULO II .....	24
METODOLOGÍA .....	24
2.1 Detalle de las partes del proyecto .....	25
2.1.1 Primera Parte.....	25
2.1.2 Segunda y tercera parte .....	27
2.1.2.1 Identificación de objetivos.....	29
2.1.2.2 Definición del dominio .....	29
2.1.2.3 Definición de la geometría.....	29
2.1.2.4 Definición de la malla .....	30
2.1.2.4 Configuración del solver.....	31
2.1.2.5 Cálculo de la solución.....	32
2.1.2.5 Resultados .....	32
2.2 Materiales.....	33
2.2.1 ANSYS Fluent .....	33
2.2.2. Modelado en 3D del quemador .....	34
2.2.3 Gas licuado de petróleo.....	34
2.3 Métodos.....	34
2.3.1 Método experimental teórico .....	34
2.3.2 Método comparativo .....	35
2.3.3 Método cuantitativo .....	35
2.3.4 Método bibliográfico.....	35
2.3.5 Método teórico de modelación.....	35
2.3.6 Población y muestra.....	35
2.3.6.1 Población.....	35
2.3.6.2 Muestra .....	35

2.5. Técnica e instrumentos de recolección y procesamiento de datos.....	36
2.6. Herramienta para el procesamiento de datos.....	36
2.7 Planteamiento de hipótesis.....	36
2.7.3. Identificación de variables.....	36
2.8 Operacionalización de las variables.....	37
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>38</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>38</b>
3.1 Cálculo de la reacción estequiométrica.....	38
3.1.1 Cálculo de caudal de combustible.....	38
3.1.2 Cálculo de la combustión.....	39
3.1.3 Cálculo de la relación aire combustible.....	40
3.2 Calor generado, mezcla aire combustible.....	42
3.2.1 Cálculo de flujo másico de acuerdo al calor generado.....	42
3.2.2 Diagrama T-S del proceso de mezcla adiabática reversible.....	43
3.3 Modelado.....	43
3.3.1 Preparación del modelo de simulación.....	45
3.3.1.1 Desarrollo del dominio.....	45
3.3.1.2 Desarrollo y validación del mallado.....	47
3.3.1.2.1 Especificación de malla global.....	48
3.3.1.2.2 Especificación de malla local.....	50
3.3.1.2.3 Generación de malla.....	51
3.3.1.2.4 Validación de la malla.....	54
3.3.1.3 Definición de names selection.....	55
3.4 Configuración del solver.....	56
3.5 Análisis de resultados.....	61
3.5.1 Resultados de la primera etapa.....	61
3.5.2 Análisis de los resultados de la primera etapa.....	66
3.5.3 Resultados de la segunda etapa.....	68
3.5.3.1 Resultados de simulaciones de la segunda etapa.....	68
3.5.4 Análisis de los resultados de la segunda etapa.....	71
3.5.5 Resultados de la tercera etapa.....	73
3.5.5.1 Resultados del comportamiento de la velocidad de la mezcla en el agujero de salida a la atmósfera.....	73
3.5.6 Análisis de la cuarta etapa.....	76
3.5.6.1 Procedimiento para la simulación.....	76

3.5.6.2 Resultados de la cuarta etapa .....	79
3.5.7 Análisis geométrico de las zonas de la flama.....	80
3.6 Validación de resultados .....	82
3.6.1 Calculo del error relativo .....	84
3.7 Verificación de la hipótesis.....	85
CAPITULO IV .....	86
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86
4.1 Conclusiones .....	86
4.2 Recomendaciones .....	87
BIBLIOGRAFÍA .....	88
ANEXOS .....	91
<b>INDICE DE FIGURAS</b>	
Figura 1.1 Ejemplificación primera ley de la termodinámica. [5] .....	5
Figura 1.2 Elementos presentes en una mezcla de fluidos. [6] .....	7
Figura 1.3 Elementos presentes en la combustión. [9].....	9
Figura 1.4 Panorama de una combustión completa e incompleta. [7] .....	9
Figura 1.5 Proceso de combustión de un quemador a temperaturas altas. [11] .....	12
Figura 1.6 Ilustración de llama turbulenta. [11].....	12
Figura 1.7 Ilustración de llama laminar. [11].....	13
Figura 1.8 Esquema de un quemador. [12] .....	14
Figura 1.9 Partes de un quemador a gas HERLO. [13].....	14
Figura 1.10 Ejemplificación de simulación CFD. [14] .....	17
Figura 1.11 Ejemplo de malla tetraédrica. [16] .....	17
Figura 1.12 Tipos de elementos de malla 2D y 3D. [16] .....	18
Figura 1.13 Escala de calificación de Skewness mesh metric. [18].....	19
Figura 1.14 Discretización de malla para volúmenes finitos. [19] .....	20
Figura 1.15 Contornos de temperatura utilizando Modelado del transporte de especies y la química de tasa finita. [20].....	22
Figura 1.16 Contornos de temperatura utilizando “premixed partially combustión”. [20]....	23
Figura 2. 1 Flujograma del proceso simulación del quemador Venturi. [Autor] .....	28
Figura 2.2 Quemador Venturi simplificado para simular. [Autor] .....	29
Figura 3.1 Diagrama T-S del proceso de mezcla. [Autor] .....	43
Figura 3.2 Modelado del quemador del laboratorio de Energía de la FICM. [Autor] .....	43
Figura 3.3 Solido a extraer el volumen. [Autor] .....	45
Figura 3.4 Opción de Volume extract. [Autor] .....	45
Figura 3.5 Señalamiento de aristas que encierran el dominio. [Autor].....	46

Figura 3.6 Volumen extraído del quemador. [Autor] .....	46
Figura 3.7 Anidamiento entre geometría y malla. [Autor].....	47
Figura 3.8 Interfaz de mallado. [Autor] .....	47
Figura 3.9 Proceso de mallado. [Autor].....	48
Figura 3.10 Señalamiento de la física del estudio. [Autor].....	48
Figura 3.11 Parámetros de mallado global. [Autor].....	49
Figura 3.12 Parámetros de mallado local (método tetraédrico). [Autor] .....	50
Figura 3.13 Zona donde se realiza el refinamiento. [Autor] .....	51
Figura 3.14 Aplicación de “refinement”. [Autor].....	51
Figura 3.15 Métrica de elementos. [Autor].....	54
Figura 3.16 Detalles de métrica de malla. [Autor].....	54
Figura 3.17 Creación de los names selection. [Autor] .....	55
Figura 3.18 Detalles de los names selection. [Autor] .....	55
Figura 3.19 Anidamiento de geometría, mallado y solver. [Autor] .....	56
Figura 3.20 Configuración de la ventana inicial del solver. [Autor].....	56
Figura 3.21 Interfaz de ANSYS Fluent. [Autor].....	57
Figura 3.22 Árbol de opciones de Models. [Autor] .....	57
Figura 3.23 Activación de la ecuación de energía y el régimen del fluido. [Autor] .....	57
Figura 3.24 Selección del modelo de transporte de especies. [Autor] .....	58
Figura 3.25 Condiciones de borde. [Autor] .....	58
Figura 3.26 Presión absoluta en pascales de entrada de flujo. [Autor] .....	59
Figura 3.27 Temperatura y fracción molar de entrada de aire. [Autor] .....	59
Figura 3.28 Detalles de inicialización. [Autor].....	60
Figura 3.29 Detalles del cálculo computacional. [Autor] .....	60
Figura 3.30 Gráfica de escala residual. [Autor] .....	61
Figura 3.31 Etapas del modelo del quemador. [Autor].....	61
Figura 3.32 Longitudes en la primera etapa del quemador. [Autor].....	66
Figura 3.33 Porcentajes de propano a lo largo del quemador. [Autor].....	67
Figura 3.34 Longitudes en la segunda etapa del quemador. [Autor] .....	71
Figura 3.35 Gráfica del comportamiento de la velocidad a lo largo del Venturi. [Autor] .....	72
Figura 3.36 Geometría de los agujeros para simulación. [Autor].....	73
Figura 3.37 Dominio 2D para desarrollo de flama. [Autor] .....	76
Figura 3.38 Discretización de malla del dominio para flama. [Autor] .....	76
Figura 3.39 Parámetros de calificación Método Skewness. [Autor].....	77
Figura 3.40 Grafica de calificación respecto al número de elementos. [Autor].....	77
Figura 3.41 Names selection para condiciones de entrada. [Autor].....	78
Figura 3.42 Zonas de estudio de la flama y escala utilizada. [Autor].....	81

Figura 3.43 Muestra tomada de la flama del quemador del Laboratorio de Energía de la FICM con la cámara termográfica. [Autor] .....	82
Figura 3.44 Delimitación de las zonas de la flama tomada con una cámara termográfica. [Autor] .....	83
Figura 3.45 Resultados arrojados por el programa de las zonas obtenidas con la cámara termográfica. [Autor] .....	83
Figura 3.46 Delimitación de las zonas de la flama de simulación. [Autor] .....	83

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1.1 Porcentaje de exceso de aire de acuerdo con el tipo de combustible. [Autor] .....	10
Tabla 1.2 Composición de aire de acuerdo con la cantidad. [Autor] .....	11
Tabla 1.3 Partes de un quemador a gas. [Autor] .....	15
Tabla 1.4 Propiedades del GLP. [14] .....	16
Tabla 2.1 Características técnicas del Quemador Herlo QV-20. [Autor] .....	25
Tabla 2.2 Características técnicas del Quemador Venturi del laboratorio de Energía de la FICM. [Autor] .....	26
Tabla 2.3 Características técnicas del Quemador modelado para simulación. [Autor] .....	27
Tabla 2.4 Tabla de valores de calificación de malla” Skewness”. [Autor] .....	31
Tabla 2.5 Condiciones de operación del quemador. [Autor] .....	32
Tabla 2. 6 datos técnicos del quemador Venturi a simular [Autor] .....	36
Tabla 2.7 Operacionalización de la variable dependiente. [Autor] .....	37
Tabla 2.8 Operacionalización de la variable dependiente. [Autor] .....	37
Tabla 3.1 Masas atómicas [Autor] .....	40
Tabla 3.2 Propiedades de aire y combustible [Autor] .....	41
Tabla 3.3 Entalpías de formación. [Autor] .....	42
Tabla 3.4 Medidas generales del quemador. [Autor] .....	44
Tabla 3.5 Escala de tamaño de grano en el mallado. [Autor] .....	49
Tabla 3.6 Escala de tamaño de ángulo en el mallado. [Autor] .....	49
Tabla 3.7 Escala de refinamiento. [Autor] .....	51
Tabla 3.8 Generación de malla global. [Autor] .....	52
Tabla 3.10 Validación del mallado. [Autor] .....	55
Tabla 3.11 Resultados de velocidad en la primera etapa del quemador. [Autor] .....	62
Tabla 3.12 Resultados de velocidad en la primera etapa del quemador. [Autor] .....	63
Tabla 3.13 Resultados de porcentaje de propano en la primera etapa del quemador. [Autor]	64
Tabla 3.14 Resultados de porcentaje de oxígeno en la primera etapa del quemador. [Autor]	65
Tabla 3.15 Resultados de fracción molar de propano en la primera etapa del quemador. [Autor] .....	66
Tabla 3.16 Condiciones de frontera para las simulaciones de mezcla. [Autor] .....	68
Tabla 3.17 Resultados de velocidad en la simulación 1 a lo largo del Venturi. [Autor] .....	69

Tabla 3.18 Resultados de velocidad en la simulación 2 a lo largo del Venturi. [Autor].....	70
Tabla 3.19 Datos de velocidad a distintas posiciones en el Venturi. [Autor] .....	71
Tabla 3.20 Resultados de velocidad en la primera etapa del quemador. [Autor] .....	74
Tabla 3.21 Resultados de velocidad en la primera etapa del quemador. [Autor] .....	75
Tabla 3.22 Condiciones de entrada para simulación de flama. [Autor].....	78
Tabla 3.24 Resultados de los contornos de temperatura de flama. [Autor] .....	81
Tabla 3.25 Resultados del análisis geométrico de la isoterma de 700°K. [Autor].....	82
Tabla 3.26 Comparación de resultados de la flama generada por simulación y termografía. [Autor] .....	84
Tabla 3.27 Resultados del error relativo. [Autor] .....	85

## **INDICE DE ANEXOS**

ANEXO A-1: Catálogo Herlogas .....	91
ANEXO A-2: Propiedades de los gases ideales.....	91
ANEXO A-3: Entalpías de formación de productos y reactivos .....	92
ANEXO A-4: Muestra de una falla en la primera etapa debido a entradas de flujos insuficientes o geometrías inadecuadas .....	93
ANEXO A-5: Inadecuada velocidad en la segunda etapa (Mezcla) para desarrollo de flama .....	94
ANEXO A-6: Desarrollo inadecuado de la velocidad en el agujero de salida de mezcla .....	95
ANEXO A-7: Inadecuada estimación de la geometría del dominio de flama .....	96
ANEXO A-8: Flamas no provechosas con demasiada turbulencia o combustión inadecuada .....	96

## NOMENCLATURA

<b><i>CDF</i></b>	Dinámica de fluidos computacionales
<b><i>FEA</i></b>	Análisis por elementos finitos
<b><i>FVM</i></b>	Método de volúmenes finitos
<b><i>CAD</i></b>	Dibujo asistido por computadora
$\mu_i$	Velocidades en dirección de eje "i"
$x_i$	Coordenadas del eje "i"
<b><i>S<sub>m</sub></i></b>	Masa añadida
$\mu_j$	Velocidad en dirección del eje "j"
$\tau_{ij}$	Tensor de esfuerzos
<b><math>\rho</math></b>	Densidad
<b><math>g_i</math></b>	Gravedad en el eje i
<b><math>\Delta E_C</math></b>	Incremento de energía cinética
<b><math>\Delta E_P</math></b>	Incremento de energía potencial
<b><math>\Delta U</math></b>	Incremento de la energía interna
<b>P</b>	Presión
<b>Q</b>	Calor intercambiado por el sistema al entorno
<b>W</b>	Trabajo intercambiado por el sistema al entorno
<b>K</b>	Grados kelvin
<b><i>Psig</i></b>	Libras por pulgada cuadrada manométricas
<b>Q</b>	Potencia calorífica
<b>M</b>	Flujo másico
$\Delta t$	Poder calorífico del combustible
<b><i>C<sub>n</sub>H<sub>m</sub></i></b>	Hidrocarburos de composición general

$n$	Número de átomos de carbono
$m$	Número de átomos de hidrógeno
$V$	Volumen
$R$	Constante universal de los gases
$T$	Temperatura
$Q_{sal}$	Flujo de calor teórico
$N$	Número de moles
$\overline{h}_f$	Entalpía de formación a 25°C y 1 atm
$\overline{h}$	Entalpía de formación a T de reacción o producto
$h^\circ$	Entalpía de correación



## RESUMEN

En este trabajo experimental se analiza el proceso de combustión del Quemador tipo Venturi del Laboratorio de Energía de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica mediante simulación CFD utilizando el método de volúmenes finitos, a partir de un modelo 3D en software CAD, con extracción de volumen para discretización de malla, finalmente se generó un dominio externo en 2D para simulación de flama.

Se llevó a cabo en tres etapas, en la cual la primera es la generación de geometría y discretización de malla, esta se evaluó con el método Skewness, en la segunda etapa se realizan las simulaciones de acuerdo a diferentes condiciones de entrada. La tercera etapa comprende la validación de resultados.

Los resultados de métrica de malla fueron valores cercanos a cero, adecuados para las simulaciones. Se obtuvieron valores de eficiencia alta a medida que la velocidad del aire exterior aumenta, estos resultados se validan con una toma de flama utilizando termografía. Se comparó la forma de flama alcanzando errores relativo menores al cinco por ciento en lo que refiere a áreas de isothermas, en cuanto a perímetros y longitudes el valor de error se incrementa a un valor cercano al diez por ciento. La temperatura máxima alcanzada en el proceso de combustión fue de 900 a 1044 grados Kelvin, donde se alcanzó la mejor eficiencia con un área de isoterma de 700 grados Kelvin de 0,047 metros cuadrados correspondiente a una longitud de 0,64 metros y se alcanza una composición gas aire de 47 entre 53 a inicios de la zona de mezcla con una posición relativa  $x$  igual a 0,085 metros.

**Palabras claves:** Quemador de gas, Venturi, Mallado, Simulación, Flama e Isoterma.

## ABSTRACT

In this experimental work the combustion process of the Venturi Burner of the Energy Laboratory of the Faculty of Civil and Mechanical Engineering is analyzed by means of CFD simulation using the finite volumes method, from a 3D model in CAD software, with volume extraction for mesh discretization, a 2D external domain was finally generated for flame simulation.

It was carried out in three stages, in which the first is the generation of mesh geometry and discretization, this was evaluated with the Skewness method, in the second stage the simulations are performed according to different input conditions. The third stage comprises the validation of results.

The mesh metric results were values close to zero, suitable for the simulations. High efficiency values were obtained as the speed of the outside air increases, these results are validated with a flame intake using thermography. The shape of the flame was compared, reaching relative errors of less than five percent in terms of isotherm areas. In terms of perimeters and lengths, the error value increased to a value close to ten percent. The maximum temperature reached in the combustion process was from 900 to 1044 Kelvin degrees, where the best efficiency was reached with an isotherm area of 700 Kelvin degrees of 0.047 square meters corresponding to a length of 0.64 meters and a composition air gas from 47 to 53 at the beginning of the mixing zone with a relative position  $x$  equal to 0.085 meters.

**Keywords:** Gas Burner, Venturi, Mesh, Simulation, Flame and Isotherm.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Tema

“ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN DE UN QUEMADOR DE GAS TIPO VENTURI CON PREMEZCLA DEL LABORATORIO DE ENERGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA UTILIZANDO SIMULACIÓN CFD MEDIANTE EL SOFTWARE ANSYS FLUENT”

### 1.2. Justificación

Debido a la trascendencia en la actualidad de la aplicación de quemadores en la industria, la combustión deficiente en los mismos viene siendo objeto de estudio a grandes niveles en sus campos de aplicación como son hospitales, curtiembres y demás. Es de alta importancia conocer mediante métodos computacionales el comportamiento de los fluidos presentes en la combustión, dependiendo de la composición tanto del combustible y comburente, para tener un punto de partida que permita mitigar los efectos de una combustión incompleta, resultado de lo cual tenemos una flama inestable, con retroceso de flama o adelanto de salida de mezcla, además buscando tener una alta eficiencia en el quemador con el fin de minimizar inconvenientes en su funcionamiento y salida de gases tóxicos.

La presente investigación se desarrolla debido a que estudios de combustión se vienen dando únicamente de forma experimental; necesitando tener el mayor aprovechamiento en recursos, se desarrollan numerosas herramientas una de las más importantes la dinámica de fluidos computacional (CFD iniciales en inglés) con las cuales usando métodos numéricos y algoritmos para con ello simular flujos complejos los cuales nos llevarán a analizar el comportamiento de mezcla y flama de un quemador de aire y GLP, al cual se le aplicará excesos progresivos de aire en el exterior, punto donde ocurre la combustión, el flujo de combustible será constante, con la finalidad de poder analizar el proceso de combustión en la zona de mezclado del quemador a estudiarse, buscando una mejor eficiencia de acuerdo a la geometría y a la cantidad de aire presente.

El estudio se realiza en el software ANSYS que como es de conocimiento es uno de los mejores para este tipo de simulaciones, este programa permite la solución de

problemáticas de comportamientos de fluidos mediante su apartado de “Fluent” esto se realiza utilizando el método de volúmenes finitos, para el estudio de combustión existen “módulos” en los que facilita la entrada de condiciones de borde para llevar a cabo la simulación.

La investigación generará datos relevantes a la comunidad científica que busca entender más de los quemadores para buscar posibles soluciones a los problemas; en la escena nacional no existen muchos de estos casos de estudio, el presente trabajo es esencial con la que se obtendrán datos como presión, distribución de temperatura, entre otros, ayudando a conocer características de cada flama de acuerdo con su composición. El trabajo tiene una utilidad metodológica, ya que en el futuro podrían realizarse estudios similares con los distintos tipos de quemadores presentes en la industria, buscando futuras comparaciones entre los mismos, teniendo así un punto de partida en el momento de adquisición.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Analizar la combustión de un quemador de gas tipo Venturi con premezcla del Laboratorio de Energía de la Facultad Ingeniería Mecánica utilizando simulación CFD mediante el software ANSYS Fluent.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Modelar el quemador de gas tipo Venturi con premezcla de acuerdo con el modelo presente en el laboratorio en base a catálogos de quemadores existentes en el mercado para poder realizar la simulación.
- Desarrollar el modelo de discretización de malla de acuerdo a las trayectorias del fluido en el quemador.
- Simular el proceso de combustión en el quemador de acuerdo con 6 parámetros distintos de condiciones iniciales, variando el exceso de aire y manteniendo el mismo flujo de combustible.
- Validar los resultados obtenidos de acuerdo con criterios técnicos de combustión.

#### **1.4 Antecedentes Investigativos**

A continuación, se detallan 4 estudios acerca del análisis computacional de quemadores, de acuerdo con un estudio [1] para el modelo de quemador industrial bajo una geometría específica, el exceso de aire superior al 30 es ideal para quemar gas metano y así producir una combustión completa, además que ANSYS Fluent es una herramienta idónea para simular reacciones químicas mediante el método de volúmenes finitos. Esta herramienta permite simular el comportamiento de fluidos dentro de tuberías o recintos, además que cuenta con el módulo de combustión que se ajusta a la necesidad planteada.

Un artículo científico [2] de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León en México, menciona que para un quemador anular tipo Canasta de acuerdo a un estudio turbulento-químico de combustión no premezclada con presencia de diferentes entradas de aire, se determina que el modelo laminar flamelet es el más adecuado debido a que simula lo más parecido a la realidad con regímenes turbulentos muy aceptables. Estudios muy recientes [3] acerca del análisis numérico aportan que, el impacto que han tenido el estudio de fluidos con la solución computacional de los modelos matemáticos, ha logrado un uso cotidiano como herramienta para optimización y diseño de cámaras de combustión. La simulación numérica es la primera etapa antes de desarrollar la construcción, lo que validará el uso de los recursos de la etapa experimental. Este tipo de análisis se realiza antes de manufacturar cualquier equipo, es decir, se ahorra una gran cantidad de recursos económicos, y más importante, entregar prototipos y modelos óptimos. La aplicación de soluciones numéricas a biocombustibles permite estudiar la inestabilidad de sus componentes. Por ejemplo, el precalentamiento del aire de entrada, incrementar la temperatura de la flama o la diferencia en mezclas de biogás. En esta investigación se observó a partir de una llama de premezcla su poder calórico de flama no premezclada de un quemador utilizando un flujo vertical de gas, con introducción de aire axial y una inyección de combustible radial. La inyección tangencial de aire genera un lugar para la recirculación; una zona de recirculación que aumenta el momento presente de la mezcla de los reactantes y productos para tener un mejor quemado. Para finalizar, un estudio [4] de “Análisis y mejora mediante CFD de un quemador atmosférico de doble corona” menciona que de acuerdo a la composición geométrica del elemento (en donde

se analizan dos puntos importantes, el diseño geométrico y el diseño espacial) se necesita incrementar el valor de aire primario presente en las portas debido al arrastre de aire en la zona inferior del Venturi, además de generar estabilidad en la velocidad del flujo a la salida de las portas para disminuir la presencia de fenómenos como retroceso de flama y desprendimiento de flama.

## 1.5 Fundamentación teórica

### 1.5.1 Termodinámica

Considerada dentro de las ramas de la física, la termodinámica se define como la ciencia que se encarga del estudio de la energía, enfocada principalmente en la transformación de la misma mediante calor o trabajo. Esta transformación se puede dar de diversas maneras como, refrigeración y haciendo hincapié en una de ellas, el estudio de la combustión, fenómeno perteneciente al sin número de intercambios de energía que estudia la misma.

#### 1.5.1.1 Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica es una declaración sobre la conservación de la energía y clasifica el método de transferencia de energía en dos formas básicas: trabajo (W) y calor (Q). La energía "interna" de un sistema (U) (para un contenedor de gas ideal, U = energía cinética de las moléculas) se puede cambiar transfiriendo calor hacia y desde el medio ambiente y / o realizando trabajo sobre o por el medio ambiente. [5]

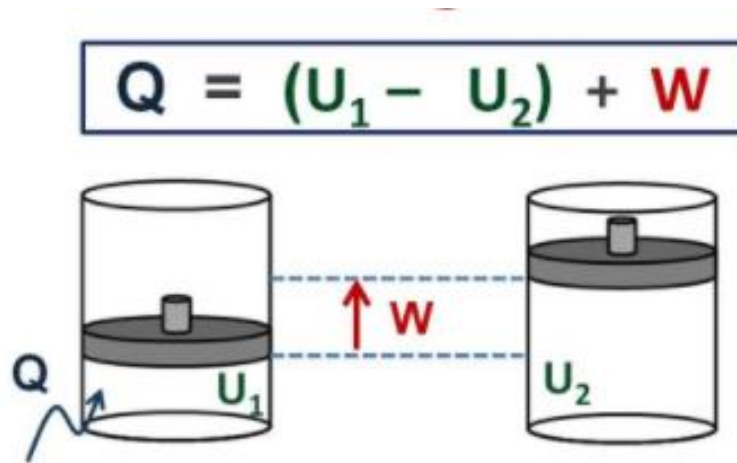


Figura 1.1 Ejemplificación primera ley de la termodinámica. [5]

#### 1.5.1.2 Segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica es una ley límite. Da el límite superior de eficiencia de un sistema. La segunda ley también reconoce que los procesos siguen en una dirección determinada pero no en la dirección opuesta. También define la propiedad importante llamada entropía. [6]

Es de sentido común conocer que, el calor no fluirá espontáneamente de un cuerpo a una temperatura más baja a, un cuerpo a una temperatura más alta. Para transferir calor de una temperatura más baja a una temperatura más alta de forma continua (es decir, para mantener la temperatura baja), se necesita un sistema de refrigeración que requiera la entrada de trabajo de una fuente externa. Este es uno de los principios de la segunda ley de la termodinámica, que se conoce como declaración de Clausius de la segunda ley. [6]

### **1.5.1.3 Tercera ley de la termodinámica**

Esta ley da la definición del valor absoluto de la entropía y también establece que no se puede alcanzar el cero absoluto. Otra versión de esta ley es que "la entropía de los cristales perfectos es cero en el cero absoluto". Esta declaración se atribuye a Planck. Esto está en línea con el concepto de que la entropía es una medida del desorden del sistema. Si " $\omega$ " es la probabilidad de lograr un estado particular entre un gran número de estados; entonces la entropía del sistema es igual a  $\ln(\omega)$ . [6]

Los teoremas y enunciados más importantes relacionados con la tercera ley de la termodinámica son:

- Teorema de Nernst
- Enunciado de Nernst-Simon
- Enunciado de Planck
- Teorema de la inaccesibilidad del cero absoluto
- 4° Postulado de Callen

### **1.5.1.4 Mezcla de gases**

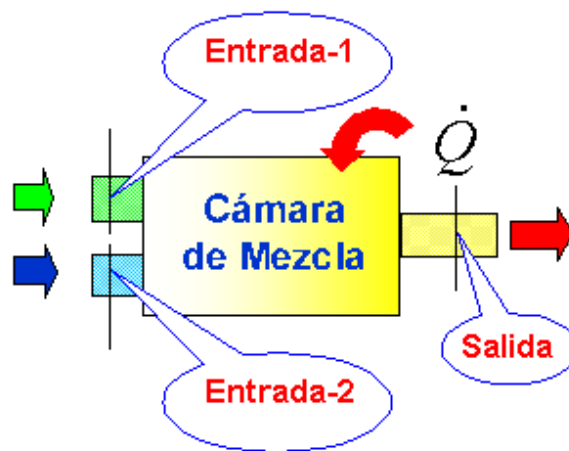
Para tratar la mezcla de gases primero debemos conocer las propiedades de cada uno de los componentes, ya una vez analizado esto se determinará la composición de la



mezcla. El análisis se lo puede realizar mediante forma molar o gravimétrica, al final llegando a una masa total.

### 1.5.1.1 Mezclador adiabático

Como es de conocimiento general, un proceso adiabático conlleva un no intercambio de calor con el ambiente. Para este caso puntual de un mezclador de dos gases adiabático, se inyectan por dos diferentes entradas a condiciones similares para que se pueda realizar el mezclado. Para estos casos se consideran despreciables tanto la energía cinética como potencial.



*Figura 1.2 Elementos presentes en una mezcla de fluidos. [6]*

### 1.5.2 Transferencia de calor

Dentro del estudio de la termodinámica tenemos la transferencia de calor, en pocas palabras la transferencia de calor estudia el cómo ocurre este fenómeno, sus formas y causas, cosa distinta a la termodinámica que en cambio nos refleja los resultados de esa transferencia.

Además, consiste en el proceso del movimiento de energía que se transfiere de un sistema a otro, a una diferencia de temperatura. Para que ocurra este proceso de intercambio de energía interviene estos cálculos; las temperaturas finales de los materiales, así como, el tiempo que emplean los materiales para alcanzar el equilibrio térmico. [7]

De acuerdo a [8] dice que el calor corresponde que por su peculiar naturaleza figura como una de las primeras cosas percibidas por el ser humano. No obstante, se obtuvo una verdadera comprensión física de la naturaleza del calor; a partir de mediados del siglo XIX donde se descubrieron teorías, que ayudaron con fundamentos sólidos para que el ser humano pueda entender estos principios que hoy en día resultan ser muy básicos.

### **1.5.3 Combustión**

La combustión consiste en un proceso que por medio del combustible se oxida y libera energía unida químicamente en grandes cantidades a través del aire se conduce con una temperatura de llama de aproximadamente 1900 °C. El dióxido de carbono y agua son los principales productos de la combustión de metano y aire. Para tener un eficiente proceso de limpieza de la combustión dependerá de ciertos parámetros como el suministro de oxígeno, propiedad de mezcla e historial de temperatura. Es importante observar que la relación aire-combustible es específica y fija.

De hecho, la cantidad de oxígeno y combustible en la mezcla están en proporciones perfectas o "estequiométricas" cuando dichas sustancias permiten la oxidación completa del combustible sin ningún residuo de oxígeno. Con exceso de combustible o deficiencia de oxígeno habría una mezcla rica y una llama reductora larga, amarillenta y ahumada. Esta combustión también se denomina "combinación incompleta", ya que, aunque algunas partículas están completamente oxidadas, las restantes no obtienen suficiente oxígeno para reaccionar completamente. [9]



*Figura 1.3 Elementos presentes en la combustión. [9]*

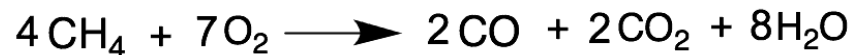
#### 1.5.2.1 Tipos de combustión

De acuerdo con un artículo de la Universidad Politécnica de Valencia [10] prevalecen dos tipos de combustión, la completa e incompleta. Esto se da de acuerdo con la cantidad de comburente y el nivel logrado en combustión.

#### Combustión completa



#### Combustión incompleta



*Figura 1.4 Panorama de una combustión completa e incompleta. [7]*

##### 1.5.2.1.1 Combustión completa

Conduce a la oxidación total de los agentes que comprenden el combustible. Siendo de hidrocarburos:

- Carbono  $CO_2$
- Hidrogeno  $H_2O$
- Azufre  $SO_2$
- Nitrógeno  $N_2$

El oxígeno participará como oxidante. Por lo general al nitrógeno se lo considera insignificante para el proceso. Es la combustión mediante una cantidad de aire igual o mayor a la estrictamente necesaria según la reacción estequiométrica.

### 1.5.2.1.2 Combustión incompleta

Se le denomina combustión incompleta cuando el porcentaje de aire es menor al de la ecuación estequiométrica requerida, al mismo tiempo que no se tiene una buena combustión.

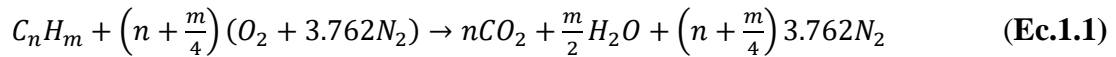
Los componentes del combustible no se oxidan de manera total debido a esto se generan los denominados inquemados, los más comunes son CO y H<sub>2</sub> ; otros posibles inquemados son carbono, restos de combustible, etc. [8] . Para que se produzca una buena combustión por lo general se usa un exceso de aire, este va a depender del tipo de combustible a usarse. En la siguiente tabla veremos las recomendaciones de exceso de aire de acuerdo con el tipo de combustible.

Tipo de combustible	Exceso en %
Combustibles solidos	40 a 150
Combustibles líquidos	25 a 60
Combustibles gaseosos	10 a 40

*Tabla 1.1 Porcentaje de exceso de aire de acuerdo con el tipo de combustible. [Autor]*

En el caso de utilizar combustible gaseoso, en este caso GLP, existe una fórmula para balancear la ecuación de acuerdo con el porcentaje de aire.

Ecuación estequiométrica completa



### 1.5.2.1.3 Aire

De acuerdo a [9] en consecuencia, de que ni  $N_2$ , ni los gases inertes del aire reaccionan durante la combustión, se los suele agrupar, y se considera que el aire está formado por 21% de  $O_2$  y 79% de  $N_2$ . Por lo tanto, que 1 kmol de aire posee 0.21 kmol de  $O_2$  y 0.79 kmol de  $N_2$ . Por lo que, para obtener 1 kmol de  $N_2$  se requiere 4.762 kmol de aire. A continuación, se presenta la composición de aire de acuerdo con la cantidad.

Cantidad de aire	Composición
1 kmol	0.79 kmol $N_2$ 0.21 kmol $O_2$
4.762 kmol	3.762 kmol $N_2$ 1 kmol $O_2$
1 kg	0.767 kg $N_2$ 0.233 kg $O_2$
4.292 kg	3.292 kg $N_2$ 1 kg $O_2$

*Tabla 1.2 Composición de aire de acuerdo con la cantidad. [Autor]*

### 1.5.2.2 Temperatura en la combustión

En absolutamente todos los procesos se busca llegar a una temperatura elevada que bordea los 1000 a 2000 C dependiendo el uso que se le va a dar. En cambio, a la temperatura máxima se conoce como temperatura de combustión, ésta alcanzará una llama durante el proceso de combustión. Inevitablemente sin la intervención del calor, no se puede producir la reacción en la combustión.

Se conoce con adiabática a la temperatura máxima obtenida de la combustión estequiométrica, en la cual se utiliza el aire necesario para el proceso de combustión. [11] La temperatura se distribuye de acuerdo al fenómeno como se muestra en la figura 1.5.



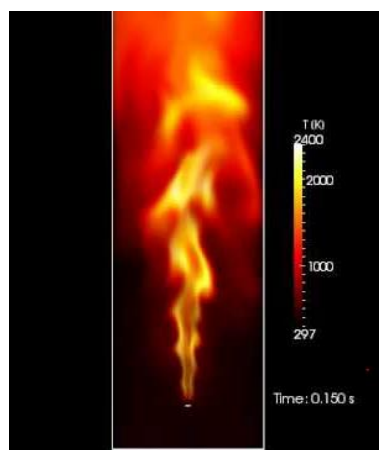
*Figura 1.5* Proceso de combustión de un quemador a temperaturas altas. [11]

### **1.5.2.3 Tipos de llama en la combustión.**

#### **1.5.2.3.3 Llamas turbulentas**

La llama que contiene un Número de Reynolds superior a 2000 se conoce como turbulenta y posee como propiedad un flujo no uniforme que es alterado por las distintas presiones, de la temperatura y la relación aire-combustible, que a su vez se aumentan o reducen dependiendo de la regulación en que se vaya a manejar. Los científicos Liao y Jiang realizaron estudios de la combustión de llamas turbulentas premezcladas. [11]

Determinaron la evidencia de aumento de la turbulencia de la llama que se produce en el exterior. La llama puede ser laminar o turbulenta de esta manera se comprueba el avance notable y preponderante. El estudio teórico de flama turbulenta no es detallado porque es más fácil hacer los cálculos al considerar llamas laminares y sus resultados se pueden analizar fácilmente. [11]



*Figura 1.6* Ilustración de llama turbulenta. [11]

#### 1.5.2.3.4 Llamas laminares

Las llamas laminares se caracterizan por tener un número de Reynolds inferior a 2000, esto significa que el flujo va tener más uniformidad lo que conlleva a que el cálculo teórico resulte más fácil. Las llamas laminares no son muy comunes de encontrar en la vida real, debido a que generalmente las flamas utilizadas son de carácter turbulento y el mismo fenómeno da para que sea turbulenta. Dejar de lado todas las perturbaciones es muy difícil, pero se puede tener resultados buenos con quemadores de poros que direccionan el flujo de la mezcla ayudando a que sea más uniforme.



*Figura 1.7 Ilustración de llama laminar. [11]*

#### 1.5.3 Quemador

Se conoce a un quemador como es un dispositivo que facilita realizar la mezcla entre el combustible y el comburente llevando a cabo la reacción de la combustión y que esta sea controlada y manejable. Con esto se asegura el suministro de ambos compuestos para llegar a la potencia calórica especificada, y de esta manera ser distribuida a los productos a producirse como se aprecia en la figura 1.8. [12]

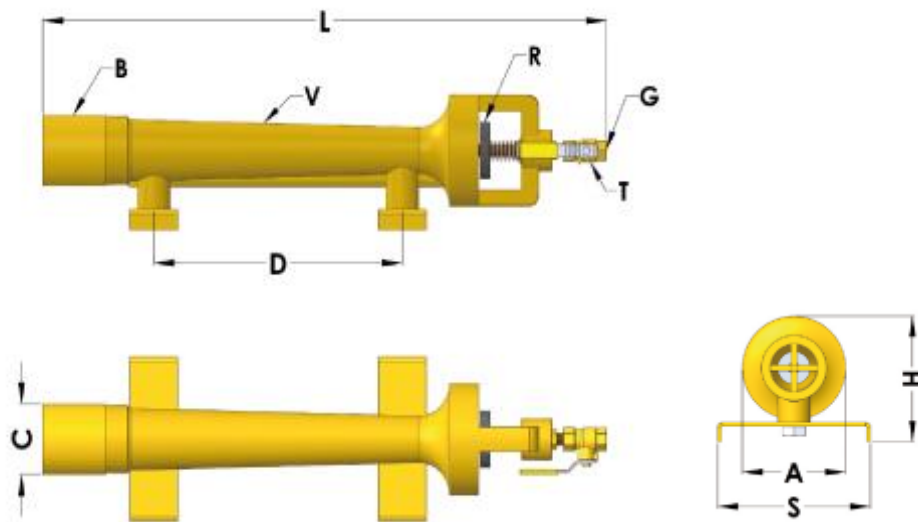


*Figura 1.8 Esquema de un quemador. [12]*

Un quemador es un elemento muy importante, por esta razón debe ser diseñado y construido de forma adecuada para cumplir con su operación y funciones de manera óptima y eficaz. [12].

### **1.5.3.1 Partes de un quemador de gas**

En la figura 1.9 se puede observar las partes de un quemador. [13]



*Figura 1.9 Partes de un quemador a gas HERLO. [13]*



<b>Letra</b>	<b>Descripción</b>
B	Boquilla
G	Entrada de gas
R	Regulador de aire
T	Válvula de gas
V	Venturi

*Tabla 1.3 Partes de un quemador a gas. [Autor]*

## **1.5.4 Combustibles**

### **1.5.4.1 Gas licuado de petróleo**

El gas licuado de petróleo consiste en una mezcla de hidrocarburos que procede de la extracción de gas natural y petróleo, éste a su vez durante el refinado de crudo, se genera en menor cantidad. En la actualidad, para las fuentes móviles el LPG se usa como combustible y en diferentes procesos, no obstante, pasaría a ser un detrimento para el medio ambiente por la emisión de hidrocarburos sin combustionar. Por ésta razón, para potenciar una solución a este inconveniente se debe gestionar fuentes de emisión y oxidación catalítica. Los metales preciosos constituyen fases típicas para este proceso; pero por la dificultad que genera estas fases (baja disponibilidad, alto costo, etc.) se ha visto la necesidad de incrementar la búsqueda de otros materiales, es así que se considera como alternativa, utilizar catalizadores que contengan pocos elementos en ese estado. [14]

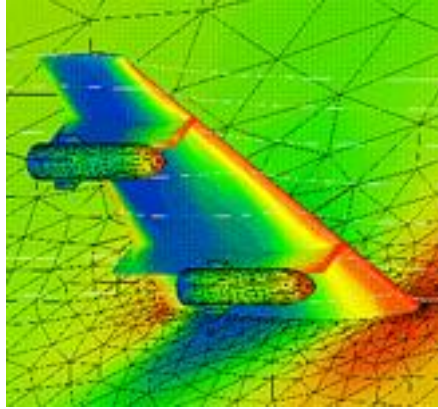
<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Aspecto	Gas licuado
Formula química	$C_3 H_8$ $C_4 H_{10}$
Composición	60% propano 40% butano

Color PH	Incoloro
Punto de ebullición	$(-42.1)C^{\circ}-(-3,7)C^{\circ}$
Punto de inflamación	$(-107,5)C^{\circ}-(-101,6)C^{\circ}$
Autoinflamabilidad	$>400C^{\circ}$
Presión del vapor	$10-14 \frac{Kg}{cm^2}$ a $37.8 C^{\circ}$
Densidad	$0.535 \frac{g}{cm^3}$ a $15 C^{\circ}$
Propiedades comburentes	NP

*Tabla 1.4 Propiedades del GLP. [14]*

### **1.5.5. Dinámica de fluidos computacional**

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta poderosa para elementos fluidos y plan térmico. Los elementos líquidos computacionales incluyen la discretización numérica de las condiciones de administración de la mecánica de líquidos para simular el flujo de líquidos, el intercambio de calor y otros procedimientos en un dominio dado. Los códigos computacionales de elementos líquidos se organizan alrededor del cálculo numérico que puede manejar problemas de flujo de líquido. Los paquetes de software comercial incorporan refinados interfaces de usuario para incluir parámetros de problemas e inspeccionar los resultados. CFD normalmente se reconoce como alusivo al tema general envolviendo la disposición numérica, por estrategias computacionales. Estas condiciones de administración, que representan la corriente de fluido, son la disposición de la condición de Navier-Stokes, la condición de continuidad y cualquier condición de conservación adicional, como energía o focos de especies. [15]

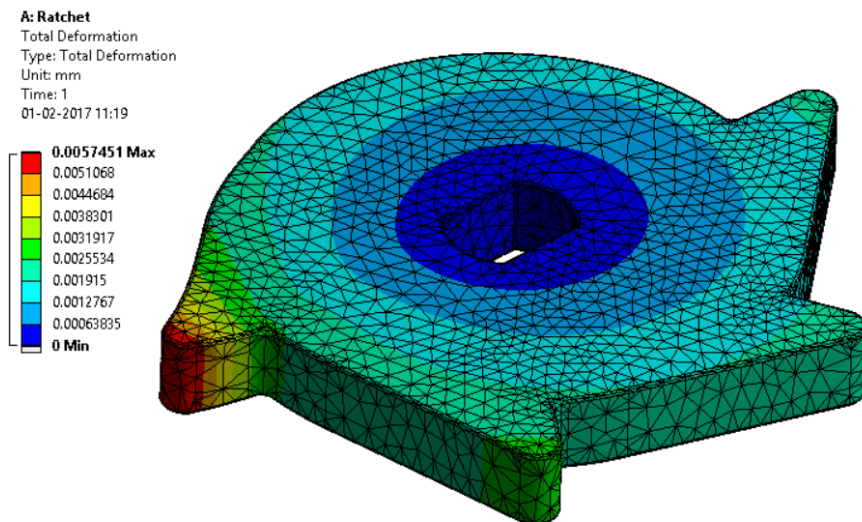


*Figura 1.10 Ejemplificación de simulación CFD. [14]*

### 1.5.5.1 Mallado

Es una parte integral del proceso de simulación de ingeniería donde las geometrías complejas se dividen en elementos simples que se pueden usar como aproximaciones locales discretas del dominio más grande.

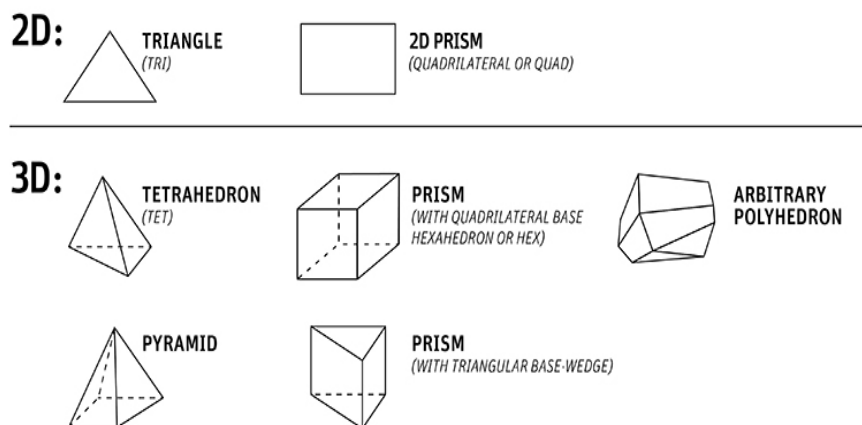
Influye en la precisión, convergencia y velocidad de la simulación. Además, dado que el mallado suele consumir una parte significativa del tiempo necesario para obtener los resultados de la simulación, cuanto mejores y más automatizadas sean las herramientas de mallado, más rápida y precisa será la solución.



*Figura 1.11 Ejemplo de malla tetraédrica. [16]*

La generación de mallas es el paso básico en cualquier simulación. En la práctica del análisis de tensiones de elementos finitos, el ingeniero primero debe saber si las tensiones clave están convergiendo y, en segundo lugar, si han convergido a un nivel razonable de precisión. Para lograr resultados confiables cuando se utiliza el método de elementos finitos, se debe asegurar que se use una malla aceptable con respecto a la forma y tamaño de los elementos. Los valores de calidad y densidad de la malla están directamente relacionados con la precisión de la solución. La convergencia del análisis de elementos finitos define la relación entre el número de elementos o DOF y la precisión del análisis. El error de discretización, es un concepto clave para el estudio de convergencia de malla, también la discretización es en función del número de grado de libertad del modelo. Se lleva a cabo una comparación detallada de diferentes resultados utilizando una prueba de convergencia basada en normas de desplazamiento y energía. En este estudio se comparan los errores entre los resultados exactos y ANSYS. [17]

ANSYS, proporciona un software de mallado inteligente, automatizado, de alto rendimiento y de uso general que produce la malla más adecuada para soluciones multifísicas precisas y eficientes, desde mallado automático y sencillo hasta mallas altamente diseñadas. Los métodos disponibles cubren el espectro de mallado de elementos lineales de alto orden y tetraédricos rápidos y poliédricos a hexaédricos y mosaicos de alta calidad.[17]



**Figura 1.12** Tipos de elementos de malla 2D y 3D. [16]

### 1.5.5.2 Métrica de malla Skewness

Para poder evaluar la convergencia de malla, para el método CFD la opción más idónea es la métrica Skewness, recomendado en numerosos estudios de dinámica de fluidos computacionales.

Es una de las principales medidas de calidad de una malla. Según la definición de asimetría, un valor de 0 indica una celda equilátera (mejor) y un valor de 1 indica una celda completamente degenerada (peor), como se indica en la figura 1.16. las caras y celdas muy sesgadas son inaceptables porque las ecuaciones que se resuelven suponen que las celdas son relativamente equiláteras / equiangulares. [18]

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

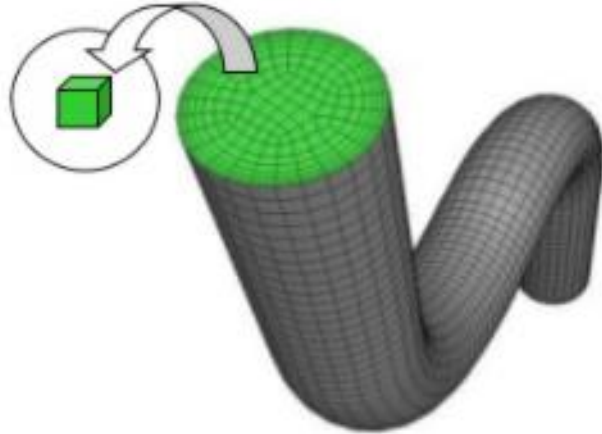
*Figura 1.13 Escala de calificación de Skewness mesh metric. [18]*

### 1.5.5.3 Método de volúmenes finitos

El método de volumen finito (FVM) se introdujo en el campo de la dinámica de fluidos computacional a principios de los años setenta (McDonald 1971, MacCormack y Paullay 1972). Desde el punto de vista físico, este método se basa en equilibrar los flujos a través de los volúmenes de control, es decir, se utiliza el concepto euleriano. La formulación integral de leyes conservadoras se discretiza directamente en el espacio. Desde el punto de vista numérico, la FVM se toma como una derivación de la FDM en un sentido geométrico y topológico, es decir, los esquemas de volumen finito simples pueden reducirse a esquemas de diferencias finitas. La FDM se basa en relaciones nodales para ecuaciones diferenciales, mientras que la FVM es una discretización de las ecuaciones gobernantes en forma integral.

El método de volumen finito también se puede considerar como un método de subdominio específico, tiene dos ventajas principales: primero, refuerza la conservación de cantidades a nivel discretizado, es decir, la masa, el momento y la energía se conservan también a escala local, los flujos entre los volúmenes de control adyacentes se equilibran directamente. En segundo lugar, los esquemas de volumen

finito aprovechan al máximo las mallas arbitrarias para aproximar geometrías complejas. La experiencia muestra que los esquemas no conservadores son generalmente menos precisos que los conservadores, particularmente en presencia de fuertes gradientes. [19]



*Figura 1.14 Discretización de malla para volúmenes finitos. [19]*

#### 1.5.5.4 ANSYS FLUENT

Ecuaciones diferenciales son resueltas mediante método numéricos, ecuaciones como de masa, energía y continuidad. A continuación, se presenta la ecuación de masa:

$$\frac{\delta(\rho\mu_i)}{\delta x_i} = S_m \quad (\text{Ec 1.2})$$

Donde:

$\mu_i =$  Velocidades en dirección de eje "i"

$x_i =$  Coordena del eje "i"

$S_m =$  Masa añadida

donde,  $S_m$  es la masa añadida al sistema por cambios de fase, la mayoría de los casos es cero. La ecuación de la cantidad de movimiento se expresa como:

$$\frac{\delta(\rho\mu_i\mu_j)}{\delta x_i} = \frac{\delta p}{\delta x_i} + \frac{\delta\tau_{ij}}{\delta x_i} + \rho g_i \quad (\text{Ec 1.3})$$

Donde:

$\mu_j =$  Velocidad en dirección del eje "j"

$\tau_{ij} =$  Tensor de esfuerzos

$\rho =$  Densidad

$g_i =$  Gravedad en el eje  $i$

donde el tensor de esfuerzos para un fluido Newtoniano se define como:

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\delta u_i}{\delta x_i} \delta_{ij} \quad (\text{Ec 1.4})$$

La ecuación de la conservación de la energía está dada por:

$$\frac{\delta}{\delta x_i} [u_i(pe + p)] = \frac{\delta}{\delta x_i} \left[ K_{eff} \frac{\delta T}{\delta x_i} - \sum_n h_n j_n + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (\text{Ec 1.5})$$

Llevándola a términos más simples tenemos:

$$\Delta E_C + \Delta E_P + \Delta U + \Delta \frac{P}{\rho} = Q + W \quad (\text{Ec 1.6})$$

Donde:

$\Delta E_C =$  Incremento de energía cinética

$\Delta E_P =$  Incremento de energía potencial

$\Delta U =$  Incremento de la energía interna

$P =$  Presión

$\rho =$  Densidad

$Q =$  Calor intercambiado por el sistema al entorno

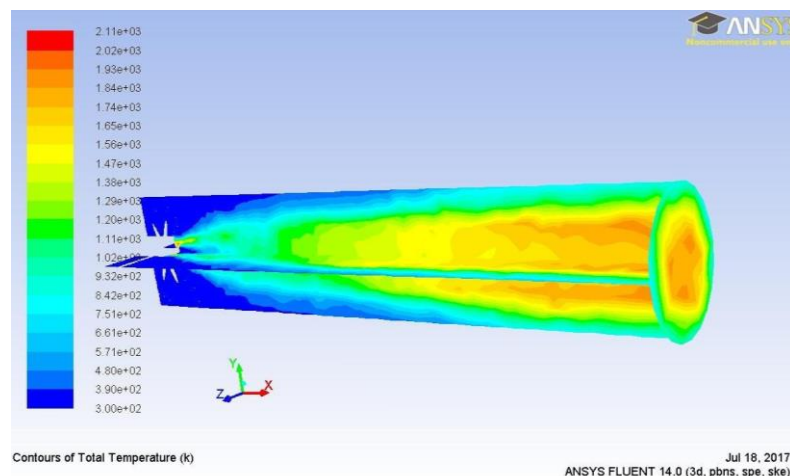
$W =$  Trabajo intercambiado por el sistema al entorno

Para casos de estudio, se utiliza el modelo de turbulencia, ya que a elevados números de Reynolds resulta en un método eficiente de resolución. Este modelo se basa en las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta y la razón de disipación, las cuales se definen de la siguiente forma: [18]

$$\frac{\delta}{\delta x_i}(pku_i) = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[ \left( u + \frac{u_t}{\sigma k} \right) \frac{\delta k}{\delta x_j} \right] + G_k + G_B + p \in -Y_m \quad (\text{Ec 1.7})$$

### 1.5.5.5 Modelado del transporte de especies y la química de tasa finita.

ANSYS Fluent modela la mezcla y el transporte de especies químicas resolviendo ecuaciones de conservación que describen fuentes de convección, difusión y reacción para cada especie o componente. Se pueden modelar múltiples reacciones químicas simultáneas, con reacciones que ocurren en la fase masiva (reacciones volumétricas) y / o en paredes o superficies de partículas, y en la región porosa. A continuación, se describen las capacidades de modelado de transporte de especies, con y sin reacciones, y las entradas que proporciona al utilizar el modelo.



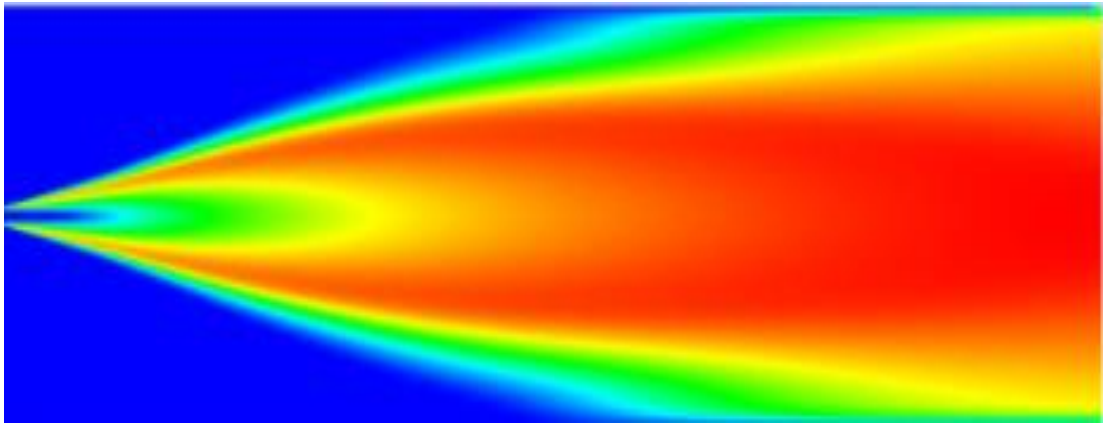
*Figura 1.15 Contornos de temperatura utilizando Modelado del transporte de especies y la química de tasa finita. [20]*

### 1.5.5.5.2 Modelo Parcialmente Premezclado

En el modelo de combustión parcialmente premezclado, transporta una fracción de mezcla. En el modelo de transporte de especies, (normalmente) resuelve una ecuación de transporte para cada especie y proporciona un modelo de reacción detallado. Pero nuevamente, debe proporcionar estos detalles. Porque también se puede transportar



una sola especie que represente la mezcla y este sería como uno de los modelos de combustión [20].



*Figura 1.16* Contornos de temperatura utilizando “premixed partially combustión”. [20]

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

El presente estudio se realiza por partes, dentro de las cuales la primera es la generación del modelo en tres dimensiones en el programa SolidWorks en base al modelo presente en el laboratorio de Energía de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica; la segunda parte es discretizar la zona donde se lleva a cabo el estudio generando malla con el método de volúmenes finitos. Luego se incluye la geometría en ANSYS Fluent donde se encuentran modelos de transferencia de masa, energía y especies químicas, los cuales se usan para la respectiva simulación.

Para los parámetros de borde para la combustión se utiliza diferentes velocidades de aire en la parte donde se genera la combustión, manteniendo los demás parámetros constantes. De acuerdo a un estudio de la Universidad Politécnica de Valencia para que exista una combustión completa se debe exceder la cantidad de aire, este porcentaje de exceso de aire va de acuerdo al tipo de combustible a utilizarse, en este caso por usarse combustible gaseoso el porcentaje de exceso recomendado va de 10 a 40 %. Para el desarrollo del estudio, ANSYS Fluent posee un modelo turbulento que se ajusta al tipo de estudio propuesto, además de un modelo de Transporte de Especies y diferentes tipos de procesos de combustión que simula reacciones químicas como en este caso de GLP con aire, simulación que ayuda a observar el comportamiento de los fluidos al momento de mezclarse en la zona del Venturi, además del desarrollo de las distintas isothermas de flama, lo que con métodos tradicionales es difícil de observar. Como tercera parte se corrobora si con más aire presente en la combustión, esta se realiza de forma completa y eficiente, ayudando así a mejorar la eficiencia del quemador, resultados que son validados de acuerdo a una muestra de flama mediante la utilización de una cámara termográfica.

## 2.1 Detalle de las partes del proyecto

### 2.1.1 Primera Parte

Incluye el modelado del quemador Venturi, la base de este quemador es tomada del modelo del quemador presente en el laboratorio de Energía de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, además de consideraciones del quemador Herlo QV-20 (ANEXO A-1) los cuales se adjuntan a continuación.

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FICM</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b> 					
FICHA DE:		MÁQUINA	X	EQUIPO	SISTEMA
		<b>QUEMADOR INDUSTRIAL HERLO</b>			
		<b>CÓDIGO:</b>		QH-20	
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>					
<b>DIMENSIONES:</b>	60x305 mm				
<b>POTENCIA MÁXIMA:</b>	20 KW	<b>PROCEDENCIA:</b>	España		
<b>PESO:</b>	1.1 Kg	<b>TIPO DE USO</b>	Industrial		
<b>PRESIÓN DE TRABAJO:</b>	1600 mmbar	<b>COMBUSTIBLE</b>	Propano		
<b>CUERPO HERLO:</b>	0.6				
<b>FUNCIÓN:</b> Su función es producir el proceso de combustión entre un gas y el aire.					

*Tabla 2.1 Características técnicas del Quemador Herlo QV-20. [Autor]*

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FICM</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b> 				
<b>FICHA DE:</b>	<b>MÁQUINA</b>	X	<b>EQUIPO</b>	<b>SISTEMA</b>
		<b>QUEMADOR VENTURI DEL LABORATORIO DE ENERGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA</b>		
		<b>CÓDIGO:</b>	Donado por estudiantes	
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>				
<b>DIMENSIONES:</b>	600x70	<b>COMBUSTIBLE:</b>	Propano	
<b>PESO:</b>	4.6 Kg	<b>PROCEDENCIA:</b>	ECU	
<b>FUNCIÓN:</b> Su función es producir el proceso de mezcla entre un gas y el aire.				

*Tabla 2.2 Características técnicas del Quemador Venturi del laboratorio de Energía de la FICM.  
[Autor]*

Con todas estas consideraciones se procede al modelado del quemador en el programa Solidworks, software de características importante para el CAD, como se mencionó con anterioridad con una mezcla de especificaciones se realiza el modelado dándonos como resultado el modelo detallado en la siguiente ficha técnica.

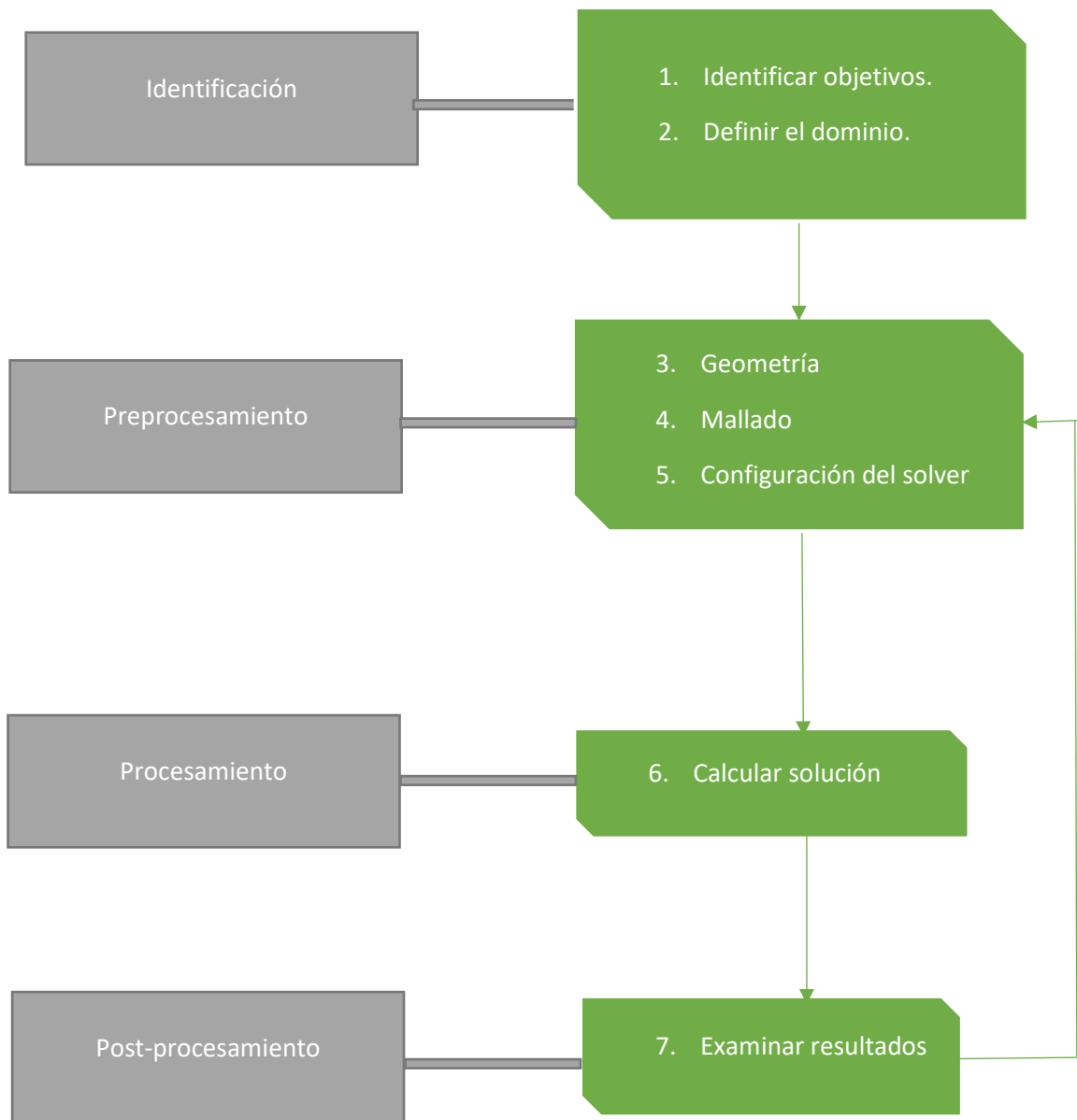
 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FICM</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b> 				
<b>FICHA DE:</b>	<b>MÁQUINA</b>	<b>X</b>	<b>EQUIPO</b>	<b>SISTEMA</b>
		<b>QUEMADOR VENTURI REPRESENTACION EN 3D</b>		
		<b>CÓDIGO:</b>	JQ-1	
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>				
<b><i>DIMENSIONES:</i></b>	70x691.82 mm			
<b><i>POTENCIA MAXIMA:</i></b>	15 KW		<b><i>PROCEDENCIA:</i></b>	ECU
<b><i>PESO:</i></b>	2.9 Kg		<b><i>TIPO DE USO</i></b>	Industrial
<b><i>PRESION DE TRABAJO:</i></b>	5 PSIg		<b><i>COMBUSTIBLE</i></b>	Propano
<b>FUNCIÓN:</b> Su función es producir el proceso de combustión entre un gas y el aire.				

*Tabla 2.3 Características técnicas del Quemador modelado para simulación. [Autor]*

### 2.1.2 Segunda y tercera parte

Dentro de la segunda y tercera parte figura el proceso de simulación y verificación de resultados, para lo cual se detalla mediante un diagrama de flujo (mostrado en la figura 2.1), dando a lugar a una serie de pasos importantes a tomar en cuenta, una secuencia

lógica y necesaria para la ejecución del programa ANSYS que es empleado en el desarrollo de este proyecto experimental, mismo que la Universidad Técnica de Ambato cuenta con la licencia pertinente para su uso académico



**Figura 2. 1** Flujograma del proceso simulación del quemador Venturi. [Autor]

### **2.1.2.1 Identificación de objetivos**

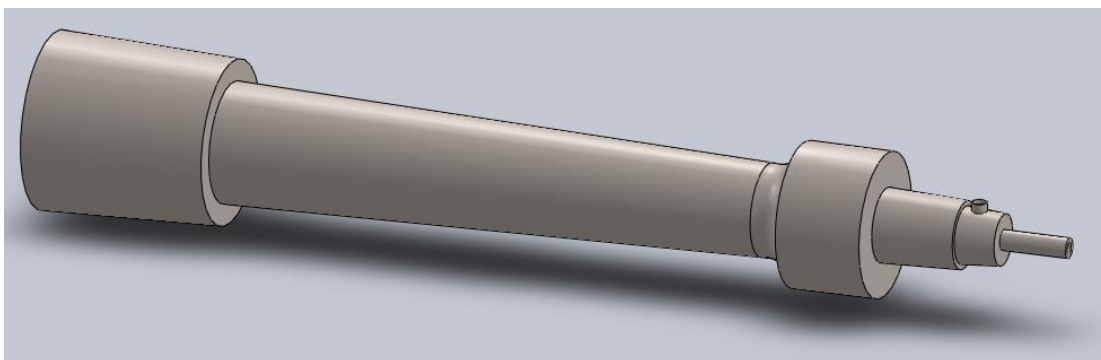
El presente proyecto busca identificar las características de mezcla de GLP con aire, de acuerdo a una variación progresiva de aire en la parte exterior, la mezcla no variará en el interior del quemador. Además, se busca observar características de la flama de acuerdo a cada velocidad de aire exterior.

### **2.1.2.2 Definición del dominio**

De acuerdo a esta la geometría del sólido el dominio viene definido por la parte del volumen interior del mismo por donde circula el flujo de gases. Este dominio puede ser realizado en algún programa CAD, en este caso se utiliza Spaceclaim, software que viene incluido en el paquete ANSYS, es una de las dos opciones de software CAD que ofrece ANSYS, quizá el más utilizado y moderno que se ajusta con rapidez a las necesidades del usuario. Para lo que refiere al análisis de flama se utiliza el otro CAD, Desing Modeller.

### **2.1.2.3 Definición de la geometría**

Como se mencionó en el apartado de primera etapa la geometría viene definida de acuerdo al modelo del quemador. Para efectos de simulación, teniendo en cuenta el gasto computacional y la importancia de la calidad de malla para que los resultados más se asemejen a la realidad, dentro de este estudio de geometría se realiza “simplificación de geometría”, proceso que reducirá la geometría a partes esenciales y necesarias para que la simulación no se vea alterada.



*Figura 2.2 Quemador Venturi simplificado para simular. [Autor]*

Luego de este paso se procede a obtener el volumen de control, lugar por donde va a circular el fluido.

Para efectos de simulación de flama se realiza un croquis rectangular, debido a que se genera de acuerdo a estimaciones donde se va a desarrollar la flama, a partir de esos generaremos una superficie y se realiza un análisis en 2D.


#### **2.1.2.4 Definición de la malla**

Para que una simulación sea exitosa el mallado debe ser idóneo, por lo cual existen técnicas de calificación de malla. De acuerdo al tipo de simulación sea esta: estructural, CFD, Electromagnética y demás; existen criterios que el software ANSYS proporciona para dicha calificación. Tratándose de CFD, de acuerdo a la Guía de Usuario de ANSYS Fluent el criterio más adecuado es “Skewness”.

Para dicha calificación existe una escala donde señala rangos de calificación que van desde la excelencia hasta lo inaceptable como se indica en la tabla 2.4. Cabe recalcar que para este proceso existe una ventana en el entorno de mallado llamada “mesh metric” donde se despliega una cinta de opciones, permitiéndonos elegir entre varias opciones de calificación, como se indicó con anterioridad se señala la que va a ser utilizada la cual una vez elegida nos dará valores de elementos de malla entre los cuales está la opción “average” traducida a nuestro idioma como promedio, valor el cual se toma en cuenta para contrastar con los valores de la tabla mencionada con anterioridad, pronosticando así una buena calidad de simulación. Cabe recalcar que la malla puede tener elementos tetraédricos o poliédricos, cualquiera de las dos opciones nos reflejará valores muy aceptables. El proceso mallado tiene una secuencia: Mallado global, local, generación de malla y calificación de malla (métrica de malla).



CALIFICACIÓN	ESCALA MENOR
<b>Excelente</b>	0 a 0.25
<b>Muy bueno</b>	0.25 a 0.5
<b>Bueno</b>	0.5 a 0.8
<b>Aceptable</b>	0.8 a 0.94
<b>Malo</b>	0.95 a 0.97
<b>Inaceptable</b>	0.97 – 1.00



*Tabla 2.4 Tabla de valores de calificación de malla "Skewness". [Autor]*

#### **2.1.2.4 Configuración del solver**

Una vez detallada la malla, el siguiente paso es ingresar a Fluent, de acuerdo a que se trata de un muestreo intencional se realiza un estudio estable, tanto para mezcla como flama, en este caso de acuerdo al volumen de control existe una entrada axial y una radial de fluido, correspondientes al combustible y al aire respectivamente. En primer lugar se activa la opción de Energía, misma que nos permite obtener valores de temperaturas, presiones y velocidades, para el régimen del fluido se opta por la opción "k epsilon" que contiene regímenes turbulentos de flujo de fluidos, denominado como el modelo estándar para estudios de simulación de procesos de mezclado en la cámara de mezcla, se utiliza el método de "transporte de especies", se toma como una mezcla de fluidos normal, esto se puede realizar ordenándole al programa que no calcule reacciones, en tanto para la simulación de flama se activa la opción de reacciones (opción que genera combustión) esto ayuda para poder observar el comportamiento de flama tomando en cuenta la mezcla que se efectuó con anterioridad.

Para las condiciones de borde se toma en cuenta condiciones ambiente y valores de presión de 2 a 5 Psig mismo que corresponde a las etapas de operación del quemador como se muestra en la tabla 2.5. El flujo de combustible está determinado de acuerdo a la potencia del quemador Herlogas y posteriormente de acuerdo al incremento de presión de acuerdo a su funcionamiento.

<b>Fases del quemador</b>	<b>Magnitud</b>
Presión en fase inicial [ <i>Psig</i> ]	2
Presión en la fase de desarrollo [ <i>Psig</i> ]	5
Estado de la llave de paso en la fase inicial	<i>Semiabierta</i>
Temperatura de propano a la entrada ( $^{\circ}K$ )	278
Temperatura de aire a la entrada ( $^{\circ}K$ )	288
Presión a la salida	<i>Atmosférica</i>
Fracción molar de propano	1
Fracción molar de aire	0,23 oxígeno 0,77 nitrógeno

*Tabla 2.5 Condiciones de operación del quemador. [Autor]*

Para lo que respecta a la simulación de flama se utilizan los valores arrojados de la simulación de mezcla como condiciones iniciales.

#### **2.1.2.5 Cálculo de la solución**

Como sugerencia del curso de combustión proporcionado de ANSYS se realizan 2000 iteraciones, con el fin de asegurar una simulación con valores aceptables. De igual manera el tiempo sugerido por iteración es de 0,01 segundos. Se procede a inicializar, y una vez terminado este paso damos inicio a la solución.

#### **2.1.2.5 Resultados**

ANSYS Fluent proporciona su apartado “CFD Post” de resultados, donde dependiendo la necesidad y de acuerdo a la forma se busca que nos arroje los resultados, tenemos opciones de planos, contornos vectores, etc., las opciones son numerosas para distintos

estudios, para este caso se opta por perfiles de velocidades, temperaturas, presiones y fracciones molares resultados que se validaran como ya se mencionó con anterioridad.

## **2.2 Materiales**

Para el desarrollo de la simulación del presente trabajo se utiliza el software ANSYS, el apartado de Fluent para ser más específico.

ANSYS es una herramienta computacional que permite resolver problemas de Ingeniería, que van desde análisis de esfuerzo hasta problemas de mecánica de fluidos, además de un sinnúmero de otras aplicaciones, de acuerdo con la necesidad de análisis, posee sus distintos apartados entre ellos ANSYS FLUENT.

### **2.2.1 ANSYS Fluent**

Fluent es el software de simulación de fluidos líder en la industria que se utiliza para predecir el flujo de fluidos, la transferencia de calor y masa, reacciones químicas y otros fenómenos relacionados. Conocido por ofrecer las soluciones más precisas de acuerdo al caso de estudio, las capacidades avanzadas de modelado de física de Fluent incluyen modelos de turbulencia de vanguardia, flujos multifásicos, transferencia de calor, combustión, optimización de formas, multifísica y mucho más.

Posee una interfaz fácil de usar, Fluent utiliza un flujo de trabajo de ventana única, lo que ayuda a optimizar el proceso de CAD a la malla para obtener resultados precisos. Con un aumento significativo de la productividad, el flujo de trabajo comienza con el mallado basado en tareas, continúa con una configuración física optimizada y concluye con un postprocesamiento interactivo. Una interfaz de usuario inmersiva le permite interactuar directamente con el modelo durante la configuración de las condiciones de contorno y el postprocesamiento para crear planos, contornos, líneas de flujo y más.

Al acelerar el proceso de CAD a mallado, Fluent utiliza un flujo de trabajo de mallado basado en tareas de una sola ventana. Al reducir el tiempo práctico y las tareas repetitivas, estos flujos de trabajo basados en tareas aceleran el tiempo de malla para geometrías CAD limpias y sucias. Cada tarea en el flujo de trabajo tiene las mejores prácticas integradas, pero estas tareas, y todo el flujo de trabajo, son extremadamente

personalizables para adaptarse mejor a su aplicación. El mallado fluido también se puede ejecutar de manera eficiente en paralelo para acelerar aún más el proceso.

Fluent tiene una tecnología de mallado pendiente de patente, conocida como malla Mosaic, que acelera el tiempo de mallado y produce una solución más rápida y precisa. La tecnología de mosaico permite conexiones poliédricas entre distintos tipos de mallas mediante una combinación de elementos poliédricos hexaédricos, isotrópicos y poliédricos de mosaico de alta calidad.

### **2.2.2. Modelado en 3D del quemador**

Para el presente estudio se modeló un quemador de gas tipo Venturi basándose en un modelo real presente en el laboratorio de Ingeniería Mecánica, con pequeñas modificaciones adaptándolo a catálogos presentes en el mercado para que la simulación este muy cercana a la realidad.

### **2.2.3 Gas licuado de petróleo**

Para la presente simulación se utiliza propano, combustible gaseoso muy utilizado a nivel mundial con características importantes al momento del proceso de combustión, además que se encuentra disponible dentro de la base de datos de Fluent lo que facilita su aplicación en el análisis propuesto.

## **2.3 Métodos**

Para la realización de este proyecto técnico se utiliza los siguientes métodos:

### **2.3.1 Método experimental teórico**

El presente trabajo tendrá como objetivo analizar el comportamiento de los fluidos de un quemador a gas tipo Venturi, se recurrió a un modelo experimental, que se aplicara de forma transversal, debido a que existe material teórico suficiente para llevar a cabo el estudio y al mismo tiempo se necesita conocer los comportamientos en un momento dado de acuerdo con los parámetros establecidos para el estudio.

### **2.3.2 Método comparativo**

Este tipo de método se lo utilizará al momento de comparar los distintos resultados arrojados por el software, tantos perfiles de velocidades, presiones y distribuciones de temperatura, con los resultados de la termografía.

### **2.3.3 Método cuantitativo**

El presente trabajo se realizará en base al enfoque cuantitativo, debido a que se adapta de manera clara a los escenarios previamente mencionados en cuanto al estudio de combustión y a las necesidades de este.

### **2.3.4 Método bibliográfico**

El método bibliográfico tendrá gran incidencia en la elaboración de este proyecto técnico ya que está basado en la recolección de información procedente de libros, revistas, artículos técnicos, normas, tesis de grado, etc. Los mismos que fueron de gran importancia al momento de realizar la simulación y el correspondiente estudio.

### **2.3.5 Método teórico de modelación**

El presente trabajo se realizará con el método teórico de modelación mediante un software que permitirá obtener resultados teóricos e ideales de acuerdo con las condiciones propuestas.

### **2.3.6 Población y muestra**

#### **2.3.6.1 Población**

La población de este estudio se centrará en el quemador Venturi que se desarrolló para este preciso de estudio.

#### **2.3.6.2 Muestra**

Datos recolectados del quemador a simular, tomando en cuenta consideraciones para la operación del mismo.

<b>Quemador Venturi</b>	
Potencia máxima	15 KW
Presión de trabajo	5 Psig
Diámetro del inyector	5 mm
Dimensiones	70x691,82 mm

*Tabla 2. 6 datos técnicos del quemador Venturi a simular [Autor]*

## **2.5. Técnica e instrumentos de recolección y procesamiento de datos.**

La técnica de recolección de datos que se utiliza es un experimento, donde de acuerdo al tipo de simulación se utilizará diferentes datos de composición obtenidos mediante cálculos y además se utilizará un software para dicha simulación es decir para el procesamiento y Word para la recolección de datos.

## **2.6. Herramienta para el procesamiento de datos.**

Para el presente proyecto se utiliza el software ANSYS Fluent que permite realizar estudios de dinámica de fluidos computacionales que es lo que se requiere, además la Universidad Técnica de Ambato cuenta con la licencia respectiva el desarrollo sin problema de la simulación.

## **2.7 Planteamiento de hipótesis**

La variación de parámetros físicos para simular el Quemador del Laboratorio de Energía de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica permitirá tener una mejor eficiencia en el mismo.

### **2.7.3. Identificación de variables**

#### **Variable dependiente.**

- Parámetros físicos para simular

#### **Variable independiente.**

- Eficiencia del quemador

## 2.8 Operacionalización de las variables

<b>Variable dependiente</b>	<b>Conceptualización</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>
Parámetros de físicos para simulación	Todos aquellos parámetros que influyen en la mezcla	Aire	Cantidad de aire (100%)
		Velocidad	Velocidad del aire (0,4 m/s)
		Geometría	Posición de las entradas de flujo (Tangente a trayectoria) Ángulos en la pared de premezcla (90 y 45°)

*Tabla 2.7 Operacionalización de la variable dependiente. [Autor]*

<b>Variable independiente</b>	<b>Conceptualización</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>
Eficiencia de la combustión	Capacidad para quemar combustible	Isotermas	Tamaño de isotermas
		Mezcla insuficiente	Contornos de resultados del quemador simulado
		Residuos	Cantidad de productos

*Tabla 2.8 Operacionalización de la variable dependiente. [Autor]*

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Cálculo de la reacción estequiométrica

Para el desarrollo de las respectivas simulaciones existen condiciones de borde tanto para aire como para combustible, las mismas que se obtienen a partir de reacciones químicas y características técnicas de uno de los quemadores que se tomó en cuenta en la metodología. Para lo cual se realizarán cálculos de estequiometría, además algunos parámetros de gas ideal.

##### 3.1.1 Cálculo de caudal de combustible

**Combustible:** Propano

Presión de trabajo del Inyector: 5 PSI= 34.473 Kpa

Ø: 5 mm

Potencia calorífica: 15[KW] : 12900  $\frac{Kcal}{h}$

Poder calorífico del GLP: 11900  $\frac{Kcal}{Kg}$

$$Q = m \cdot \Delta t \quad (\text{Ec 3.1})$$

Siendo.

$$Q = \text{potencia calorífica} \left[ \frac{Kcal}{h} \right]$$

$$m_{comb} = \text{flujo masico del combustible} \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$

$$\Delta t = \text{Poder calorífico del combustible} \left[ \frac{Kcal}{Kg} \right]$$

$$m_{comb} = \frac{Q}{\Delta t} \quad (\text{Ec 3.2})$$



$$m_{comb} = \frac{12900}{11900}$$

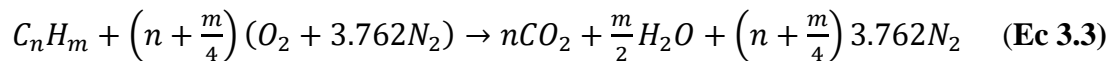
$$m_{comb} = 1,08 \frac{Kg}{h}$$

$$m_{comb} = 3 \times 10^{-4} \frac{Kg}{s}$$

### 3.1.2 Cálculo de la combustión

Para realizar los cálculos de combustión se realizan balances estequiométricos, utilizando propano [  $C_3H_8$  ] el cual representa un alto porcentaje en el GLP.

- Ecuación estequiométrica completa



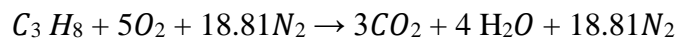
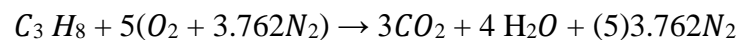
Donde:

$C_n H_m$  = Hidrocarburos de composición general "[ $C_3 H_8$ ] combustible GLP"

$n$  = Número de átomos de carbono

$m$  = Número de átomos de hidrógeno

- Ecuación balanceada



Una vez balanceada la ecuación se procede a calcular la relación aire combustible, por lo que se necesita las masas molares de los elementos, que se muestran en la tabla 3.1.

Masa Atómica	
C	12[kg/kmol]
H	1.007[kg/kmol]
O	16[kg/kmol]
N	14.0067[kg/kmol]

**Tabla 3.1** Masas atómicas [Autor]

### 3.1.3 Cálculo de la relación aire combustible

Donde:

$m_{aire}$  = masa de aire

$m_{comb}$  = masa de combustible

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \quad (\text{Ec 3.4})$$

$$AC = 15.6 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg combustible}}$$

Se determina que se usan 15.6 Kg de aire por cada kg de combustible, teniendo un porcentaje de aire de 100%.

### Flujo másico mínimo de aire para la combustión

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}}$$

$$m_{aire} = 15.6 * 3 \times 10^{-4}$$

$$m_{aire} = 4.7 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

### Flujo másico de aire primario

Considerando a los fluidos como gases y de acuerdo a la ecuación de gas ideal tenemos:

$$P * V = m * R * T \quad (\text{Ec 3.5})$$

Donde:

$P = \text{Presión}$

$V = \text{Volumen}$

$m = \text{Flujo másico}$

$R = \text{Constante universal de los gases}$

$T = \text{Temperatura}$

Una vez igualadas las ecuaciones para ambos gases y considerando  $T_a = T_c$ ,  $T_a = T_c$ , las constantes de gases ideales (**ANEXO A-2**), que no difieren mucho y  $V_a = V_c$ .

Deducimos que:

<b>Característica</b>	<b>Aire</b>	<b>Propano</b>
Cp	1,005	1,6794
Cv	0,718	1,4909
$K \left( \frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ K} \right)$	0,2870	0,1885

**Tabla3.2** Propiedades de aire y combustible [Autor]

$$m_a R_a T_a = m_c R_c T_c$$

$$m_a R_a = m_c R_c$$

$$m_a = \frac{m_c \cdot R_c}{R_a} \quad \text{(Ec 3.6)}$$

$$m_a = \frac{m_c \cdot 0,1885}{0,2870}$$

$$m_{ap} = 0,6567 m_c$$

Por lo que tenemos que el aire primario es  $1,97 \times 10^{-4} \frac{Kg}{s}$ . Dejando, así como aire secundario a la diferencia entre el aire total y el primario.

### 3.2 Calor generado, mezcla aire combustible

Se calcula el calor generado, partiendo del balance entre las entalpías de los productos y de los reactivos (**Anexo A-3**).

$$Q_{sal} = \sum N_r (\bar{h}_{o_f} + \bar{h} - h^\circ)_r - \sum N_p (\bar{h}_{o_f} + \bar{h} - h^\circ)_p \quad (\text{Ec 3.7})$$

$Q_{sal}$  : Flujo de calor teórico  $[KJ/Kmol C_3H_8]$

$N$  : número de moles

$\bar{h}_{o_f}$ : entalpía de formación a 25°C y 1 atm  $[KJ/Kmol]$

$\bar{h}$  : entalpía de formación a T de reacción o producto  $[KJ/Kmol]$

$h^\circ$  : entalpía de corrección  $[KJ/Kmol]$

	$\bar{h}_{o_f}$ 298	$\bar{h}$ 288	$h^\circ$ 298	$\bar{h}$ 773	N
$C_3H_8$	-103850	-	-	-	1
$O_2$	0	8384,4	8682,0	-	5
$N_2$	0	8373,8	8669,0	-	18,810
$CO_2$	-393520	-	9364,0	30797,0	3
$H_2O$	-285830	-	9904,0	26856,2	4
$N_2$	0	-	8669,0	22865,0	18,810
$O_2$	0	-	8682,0	23614,1	0

*Tabla 3.3 Entalpías de formación. [Autor]*

$$Q_{sal} = -110890,712 - (-1924745,44)$$

$$Q_{sal} = 1813854,73 \text{ KJ}/Kmol C_3H_8$$

#### 3.2.1 Cálculo de flujo másico de acuerdo al calor generado

$$m_{combustible} = \frac{15 \text{ KJ}/s}{1813,85473 \text{ KJ}/mol C_3H_8} \quad (\text{Ec 3.8})$$

$$m_{combustible} = 8.3 \times 10^{-3} \text{ mol } C_3H_8/s$$

$$m_{combustible} = 3.6 \times 10^{-4} \text{ Kg}/s$$

### 3.2.2 Diagrama T-S del proceso de mezcla adiabática reversible

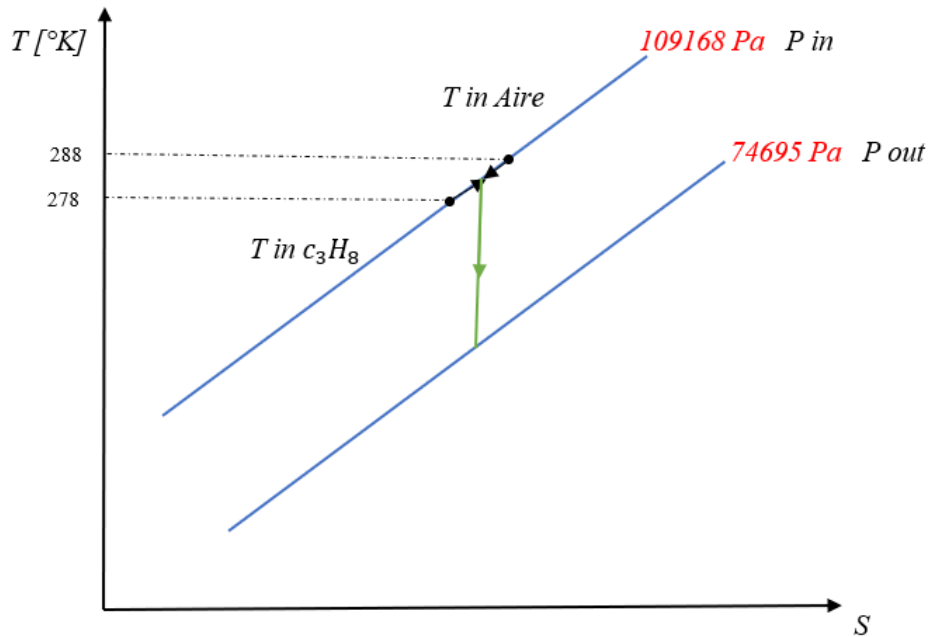


Figura 3.1 Diagrama T-S del proceso de mezcla. [Autor]

Para la mezcla: Temperatura de salida aproximada,  $T_1 = 283 \text{ K}$

Asumiendo calores específicos constantes:  $T_2 = T_1 * \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$

Tenemos como resultado  $T_{2s} = 254 \text{ K}$ , para el proceso real  $T_{2a}$  mayor a  $254 \text{ K}$

### 3.3 Modelado

Como se menciona en el capítulo II el desarrollo del modelo se basó principalmente en el modelo del laboratorio, con pequeñas adecuaciones por motivo de simulación.

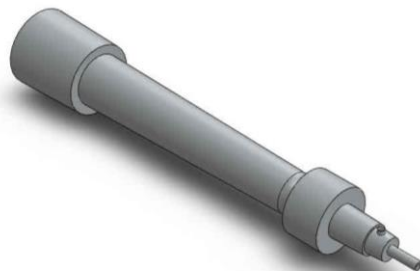


Figura 3.2 Modelado del quemador del laboratorio de Energía de la FICM. [Autor]



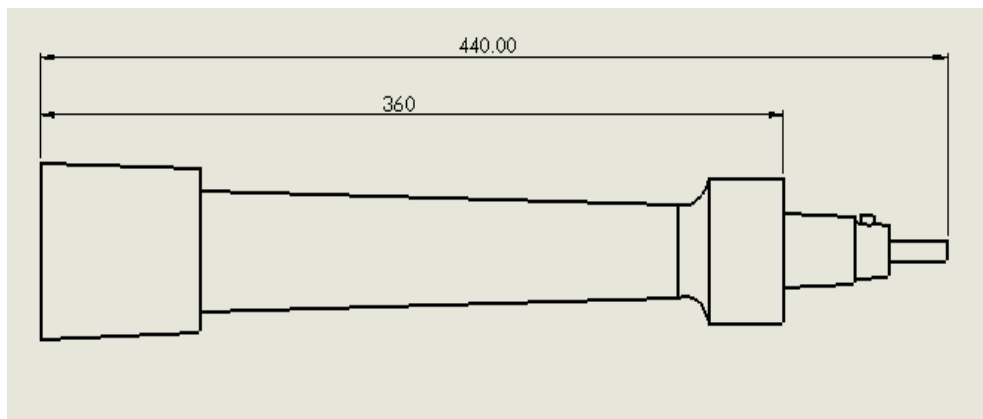
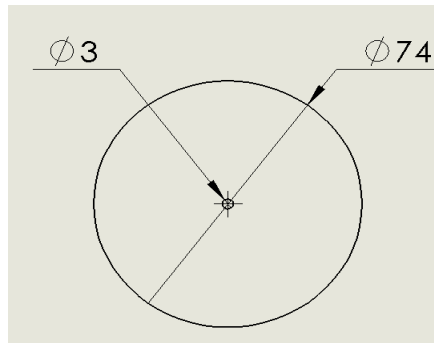
**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FICM**  
**INGENIERÍA MECÁNICA**



**MEDIDAS GENERALES DEL QUEMADOR**

<b>Tipo de quemador</b>	Quemador a gas tipo Venturi		
<b>Fecha de Ejecución:</b>	13/11/2020	<b>Realizado por:</b>	Jefferson Quinga
		<b>Revisado por:</b>	Ing. Santiago Cabrera
<b>D Inyector:</b>	4.8 mm	<b>Longitud:</b>	440 mm
<b>D entrada aire:</b>	6 mm	<b>Material:</b>	Hierro

**MEDIDAS**

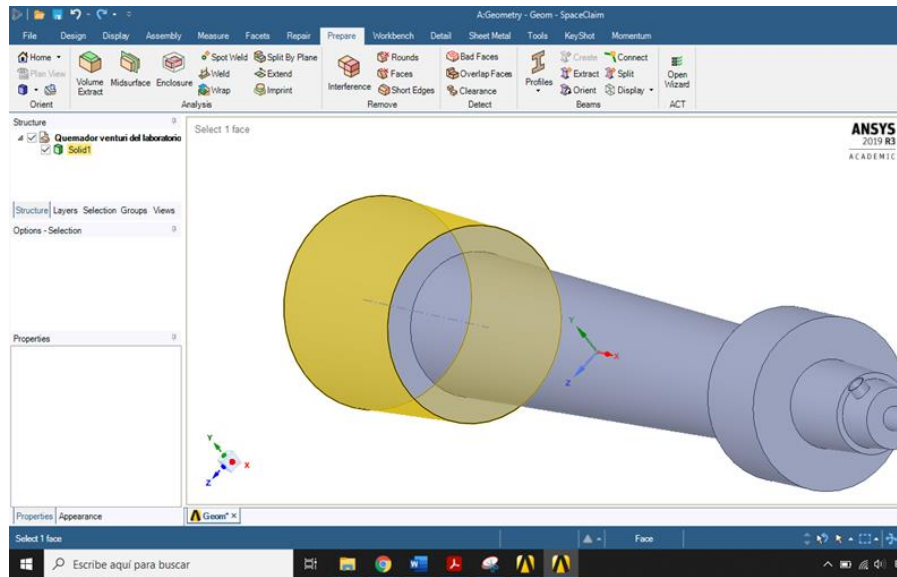


*Tabla 3.4 Medidas generales del quemador. [Autor]*

### 3.3.1 Preparación del modelo de simulación

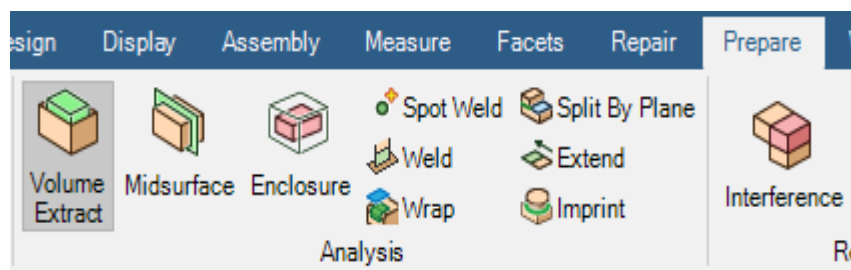
#### 3.3.1.1 Desarrollo del dominio

Para el dominio se utiliza el CAD de ANSYS que permite realizar la extracción del volumen por donde circula el fluido. Para ello se carga la opción de Geometría, click derecho y editar. Una vez abierto el entorno de Spaceclaim tenemos el solido el cual vamos a extraer el volumen.



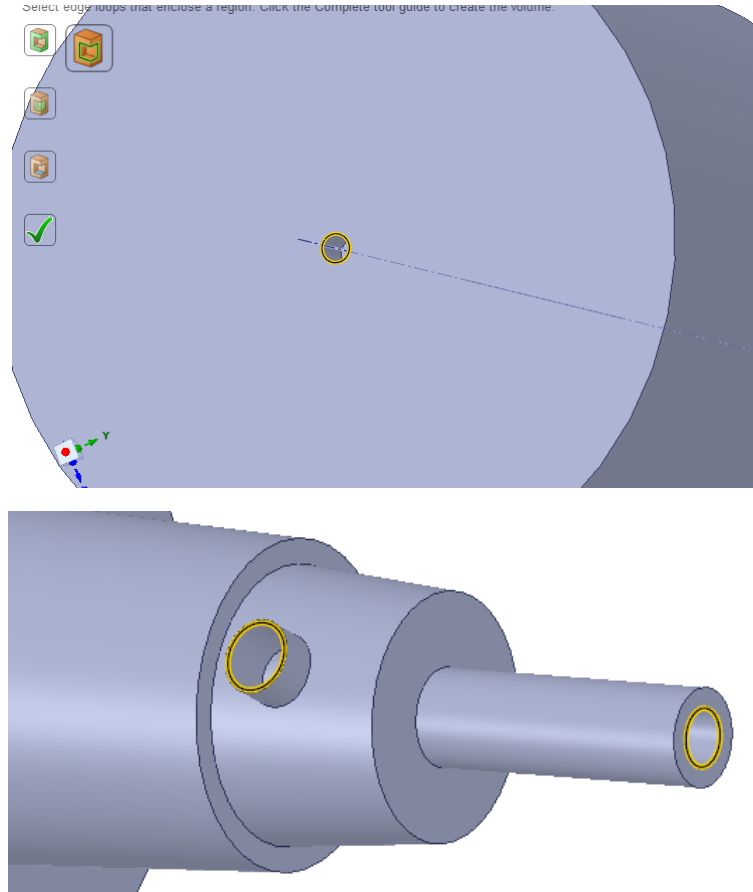
*Figura 3.3 Solido a extraer el volumen. [Autor]*

Posterior se escoge la opción “prepare” de la barra de herramientas la cual nos ayuda a realizar la operación.



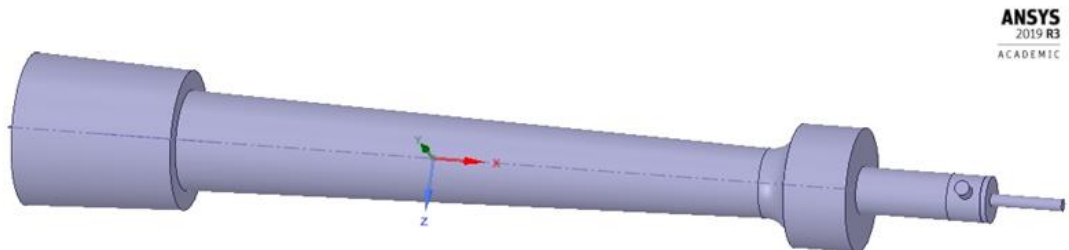
*Figura 3.4 Opción de Volume extract. [Autor]*

Para realizar la operación tenemos dos opciones donde se escoge la número 2, la cual nos ayuda a señalar aristas por donde va a circular el fluido como se muestra en la figura 3.5.



**Figura 3.5** Señalamiento de aristas que encierran el dominio. [Autor]

Una vez señaladas las aristas se genera el volumen extraído, es decir toda la parte contenida dentro del sólido como se muestra en la figura 3.6.



**Figura 3.6** Volumen extraído del quemador. [Autor]



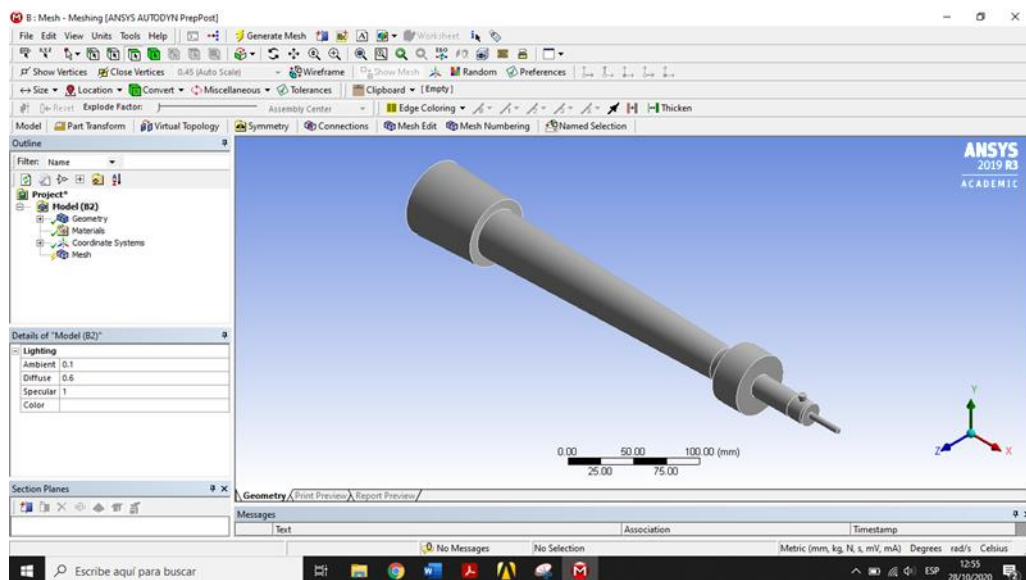
### 3.3.1.2 Desarrollo y validación del mallado

Teniendo la geometría accedemos a la parte del módulo de mallado haciendo un anidamiento al mismo.



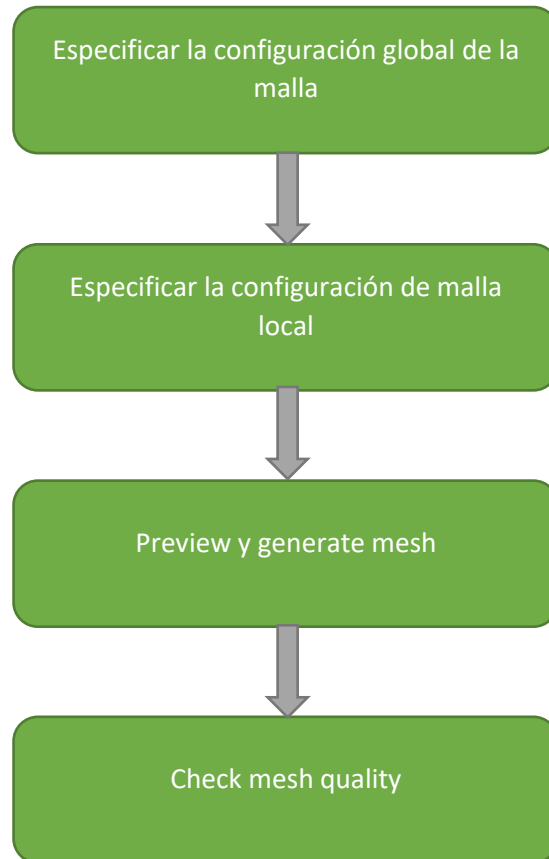
*Figura 3.7 Anidamiento entre geometría y malla. [Autor]*

La interfaz de mallado como se muestra en la figura 3.8 es un interfaz didáctico con múltiples herramientas como la mayoría de programas CAE, además cuenta con un árbol de operaciones que contiene geometría, contactos, mallado y demás.



*Figura 3.8 Interfaz de mallado. [Autor]*

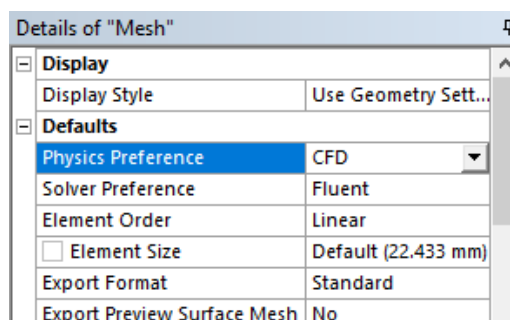
El proceso de discretización de malla es uno de los pasos fundamentales para poder obtener una simulación adecuada, por lo que este proceso se lo debe llevar a cabo con mucha objetividad para lo cual se lo realiza mediante una sucesión de pasos como se muestra en la figura 3.9.



*Figura 3.9* Proceso de mallado. [Autor]

### 3.3.1.2.1 Especificación de malla global

Una vez ingresado a la interfaz de mallado, en la parte izquierda se encuentran las opciones para el mismo, como son Display, Sizing , Quality entre otras; para el mallado global el primer paso que se toma en cuenta es la “Physics Preference” donde se señala el tipo de mallado o la física que va a llevarse a cabo en el estudio.



*Figura 3.10* Señalamiento de la física del estudio. [Autor]

Para generar la malla global se toman las siguientes consideraciones: Quitar la opción de malla adaptativa y utilizar la opción de curvatura debido a la física del elemento a ser analizado. El tamaño de grano se obtiene por default que es de 1.2, valor considerado como medio, según ANSYS Help se establecen valores de tamaños de granos como se especifica en la tabla 3.5.

Tamaño de grano	Valor
Fino	1.1
Medio	1.2
Alto	1.3

**Tabla 3.5** Escala de tamaño de grano en el mallado. [Autor]

Además, otro parámetro fundamental es “Curvature Normal Angle” valor que se deja por default de igual manera considerando los siguientes rangos para ángulo como se muestra en la tabla 3.6.

Tamaño de ángulo	Valor
Fino	12- 28
Medio	29-56
Alto	57-90

**Tabla 3.6** Escala de tamaño de ángulo en el mallado. [Autor]

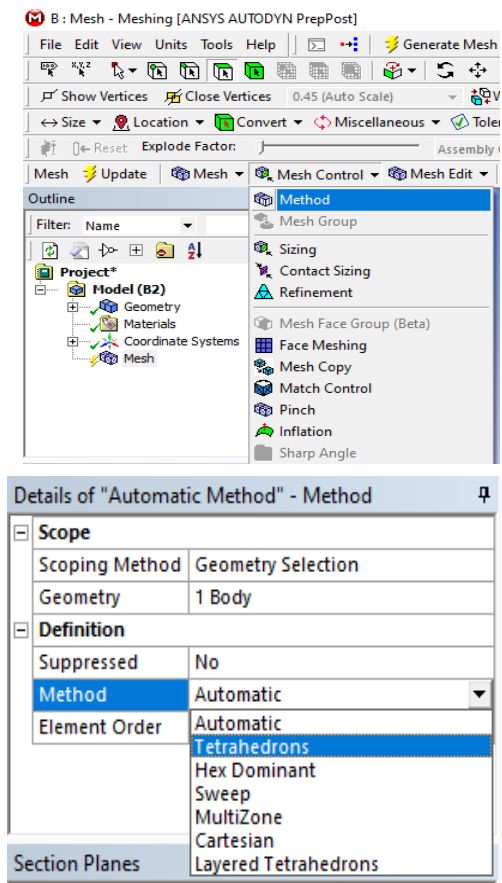
En cuanto al tamaño de elemento para esta ocasión se opta por dejarlo como da el programa.

Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.2)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (44.865 mm)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (0.11216 ...)
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Min Size	Default (0.22433 ...)
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18.0°)
Capture Proximity	No

**Figura 3.11** Parámetros de mallado global. [Autor]

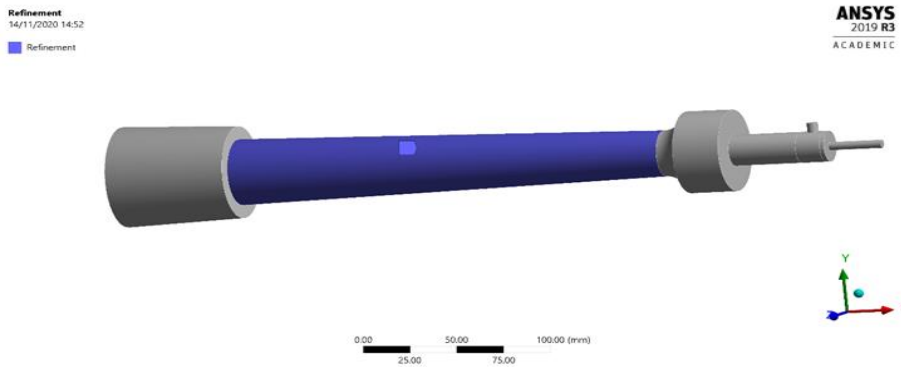
### 3.3.1.2.2 Especificación de malla local

Dentro de las especificaciones de la malla global existe el “Mesh Control” donde existen opciones para adecuar la malla acorde al estudio que se va a realizar. Para este caso se opta por aplicar un método de forma de elemento a el método tetraédrico considerando la física del sólido.



*Figura 3.12* Parámetros de mallado local (método tetraédrico). [Autor]

Luego de escoger un método se opta por realizar un refinamiento a la parte más importante del quemador, es decir a la parte del Venturi, este refinamiento se realiza señalando la cara por donde circula el fluido en el cono.



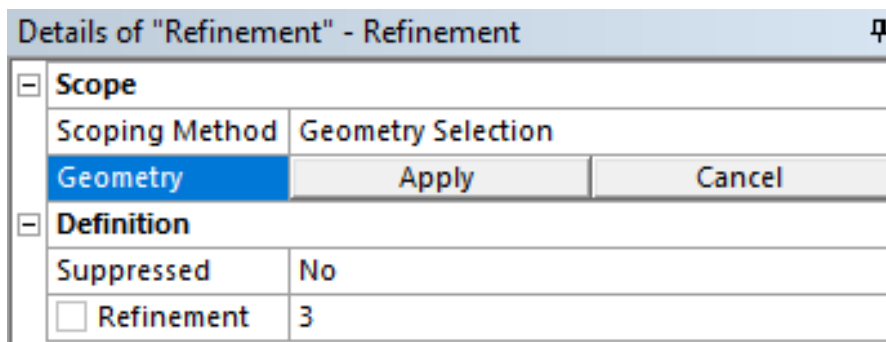
*Figura 3.13 Zona donde se realiza el refinamiento. [Autor]*

Para el refinamiento se toma en cuenta la escala que se muestra en la tabla 3.7.

Refinamiento	Valor
Fino	3
Medio	2
Grande	1

*Tabla 3.7 Escala de refinamiento. [Autor]*



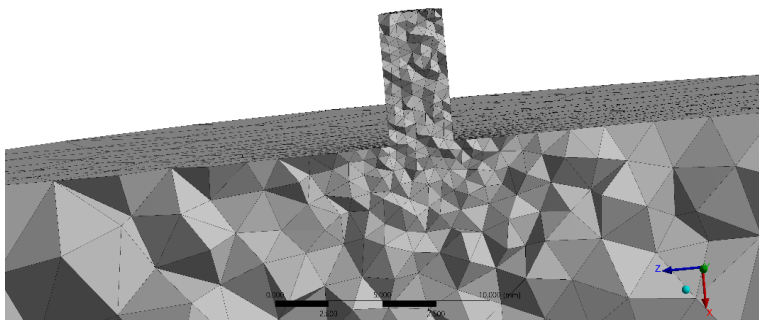
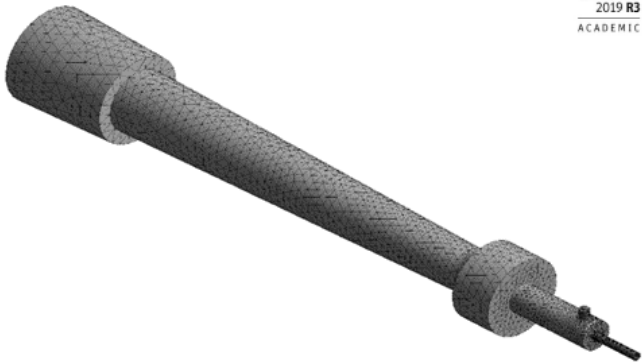


Ya aplicado a la geometría y dado el tipo de refinamiento tenemos la ventana “refinement” como se muestra en la figura 3.14



*Figura 3.14 Aplicación de “refinement”. [Autor]*



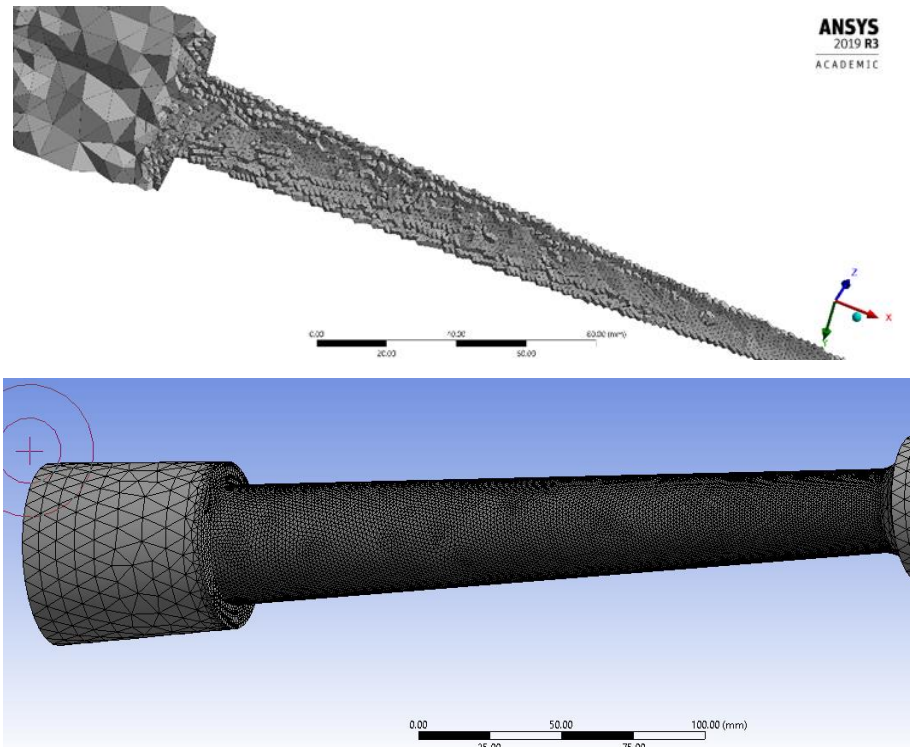
### 3.3.1.2.3 Generación de malla

Para el caso de la malla global, sin la aplicación de una malla local tenemos los siguientes resultados que se muestran en la tabla 3.6.

 <b>UUNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FICM</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
<b>Generación de malla global al elemento</b>			
<b>Tipo de quemador</b>	Quemador a gas tipo Venturi		
<b>Fecha de Ejecución:</b>	14/11/2020	<b>Realizado por:</b>	Jefferson Quinga
		<b>Revisado por:</b>	Ing. Santiago Cabrera
<b>Tamaño de grano:</b>	1.2	<b>Ángulo:</b>	18°
<b>DETALLES</b>			
   			

*Tabla 3.8 Generación de malla global. [Autor]*

Con el objetivo de tener resultados contundentes a la hora de simular aplicando un método tetraédrico y un refinamiento a la parte del Venturi tenemos lo siguiente

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b>  <b>FICM</b>  <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b> </div>  </div>			
<b>Generación de malla local al elemento</b>			
<b>Tipo de quemador</b>	Quemador a gas tipo Venturi		
<b>Fecha de Ejecución:</b>	14/11/2020	<b>Realizado por:</b>	Jefferson Quinga
		<b>Revisado por:</b>	Ing. Santiago Cabrera
<b>Método:</b>	Tetraédrico	<b>Refinement:</b>	Si
<b>DETALLES</b>			
			

*Tabla 3.9 Generación de malla local. [Autor]*

### 3.3.1.2.4 Validación de la malla

Para la validación del mallado tenemos los siguientes resultados de tamaño de elemento.

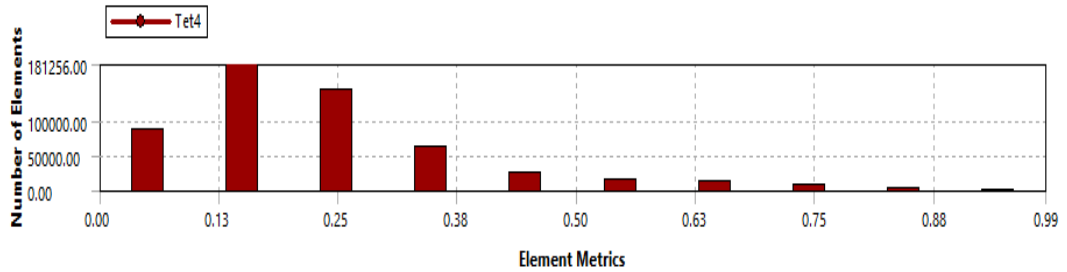


Figura 3.15 Métrica de elementos. [Autor]

A su vez obtenemos un “average” de 0.229 acorde al nivel de excelencia que buscamos.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	3.6179e-005
<input type="checkbox"/> Max	0.99223
<input type="checkbox"/> Average	0.22987
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.15029

Figura 3.16 Detalles de métrica de malla. [Autor]

Como se mencionó en el capítulo II la métrica de malla se evalúa con el método Skewness, de acuerdo al rango de calificación la malla cumple con el grado de excelencia.

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FICM</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b> 			
VALIDACIÓN DEL MALLADO			
<b>Fecha de Ejecución:</b>	14/11/2020	<b>Realizado por:</b>	Jefferson Quinga
		<b>Revisado por:</b>	Ing. Santiago Cabrera
<b>Skewness Máximo</b>	0.99	<b>Skewness Mínimo</b>	3.5e-5

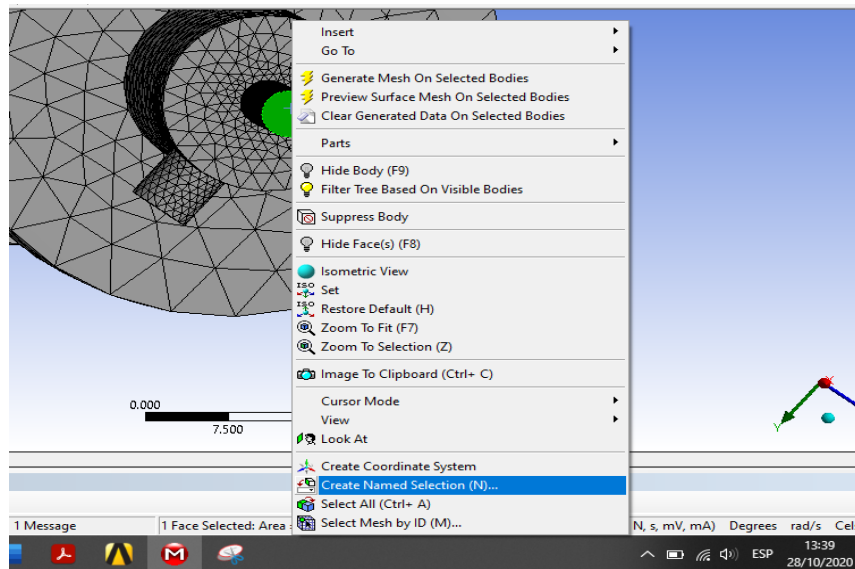


<b>Average:</b>	0.22987	<b>Número de Procesadores:</b>	4
<b>Número de Elementos:</b>	534882	<b>Número de Nodos:</b>	100994
<b>Memoria RAM: 8 GB</b>		<i>Cumple con la excelencia de acuerdo al capítulo II</i>	

*Tabla 3.10 Validación del mallado. [Autor]*

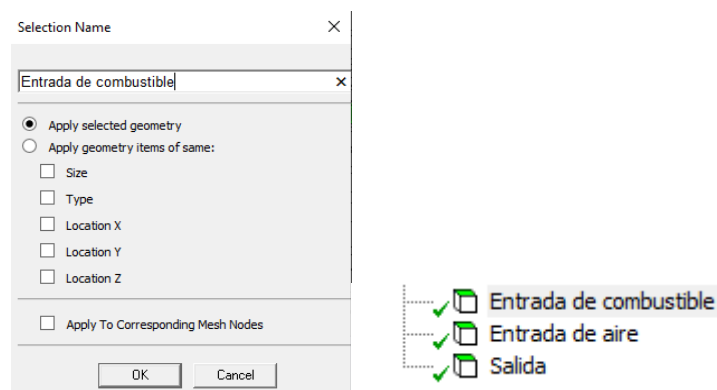
### 3.3.1.3 Definición de names selection

Para delimitar los lugares por donde va a entrar y salir el o los fluidos, se procede a señalar las caras, click derecho y se escoge la opción “create name selection”.



*Figura 3.17 Creación de los names selection. [Autor]*

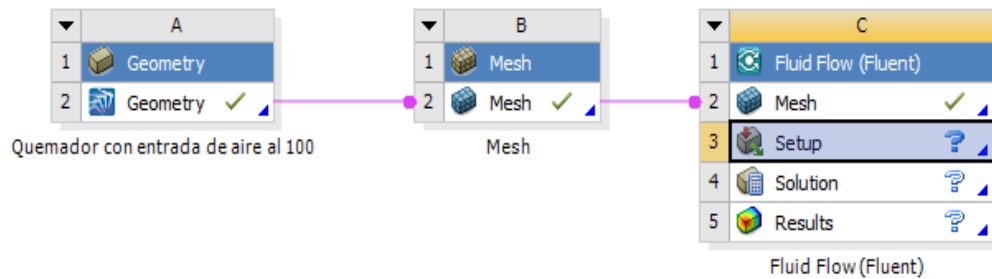
Posterior las entradas y salidas tienen el nombre acorde a la función que cumplen en la simulación a realizar.



*Figura 3.18 Detalles de los names selection. [Autor]*

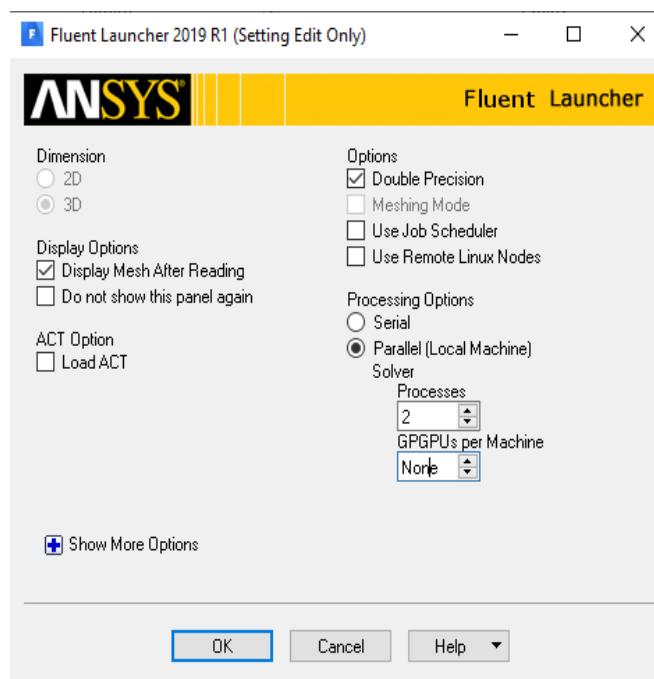
### 3.4 Configuración del solver

Para poder configurar el solver se realiza un nuevo anidamiento respecto al módulo de Fluid Flow (Fluent).



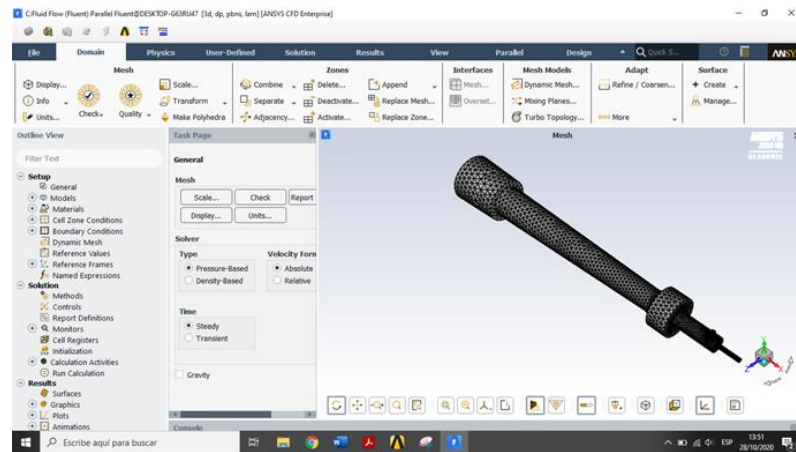
*Figura 3.19 Anidamiento de geometría, mallado y solver. [Autor]*

Como punto inicial se configura la ventana de ejecución del solver, se activa el apartado de doble precisión (16 decimales) y la opción de utilizar en paralelo el número de procesadores, en este caso existe 4 procesadores, pero debido a restricciones solo se puede utilizar la mitad.



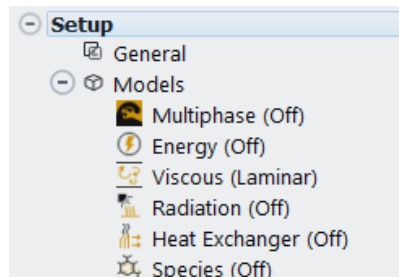
*Figura 3.20 Configuración de la ventana inicial del solver. [Autor]*

La interfaz de Fluent permite realizar múltiples operaciones para el procesamiento, para iniciar la configuración tenemos el árbol de opciones en la parte izquierda.

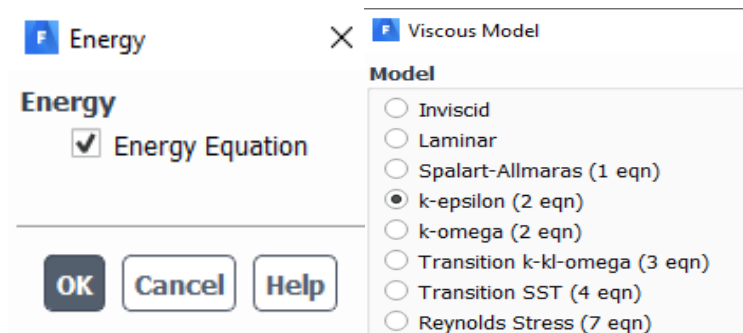


**Figura 3.21** Interfaz de ANSYS Fluent. [Autor]

Dentro de opción “models” se activa la ecuación de energía y el régimen de fluido que va a regir.



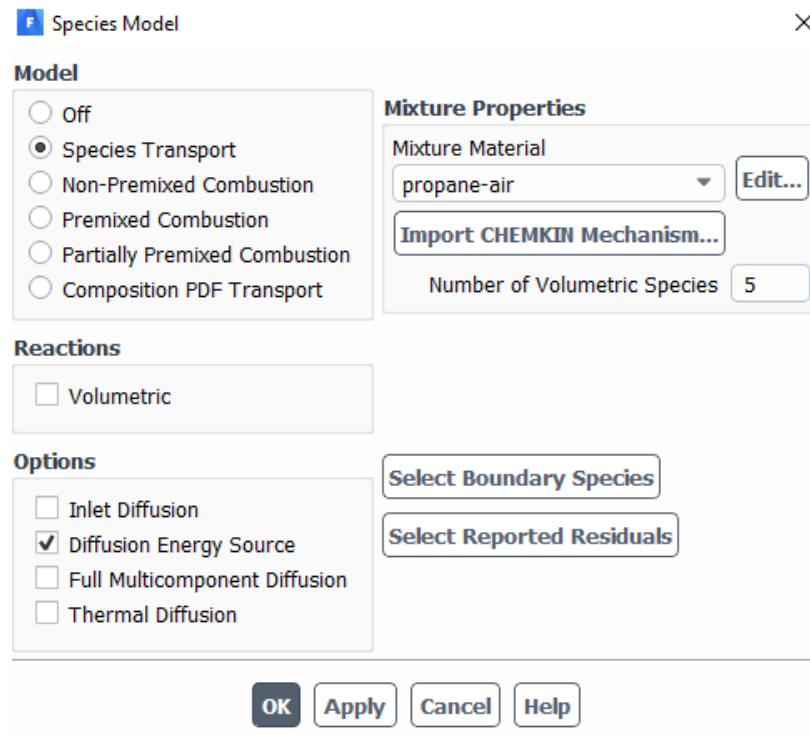
**Figura 3.22** Árbol de opciones de Models. [Autor]



**Figura 3.23** Activación de la ecuación de energía y el régimen del fluido. [Autor]

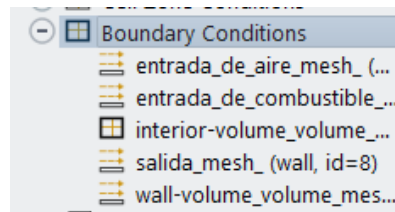
La ecuación de energía permite que el programa arroje resultados de temperatura, presiones entre otros por lo cual es fundamental para la simulación; a su vez, se opta por el modelo K  $\epsilon$  debido a que se encuentra entre el rango laminar y turbulento además de ser recomendada para estudios de mezclado.

Para el estudio de mezcla como se indica en el capítulo II se utiliza propano, además de aire, a razón de que es un mezclado de fluidos se utiliza el modelo de Transporte de Especies, el cual es idóneo ya que permite realizar mezclado sin que haya combustión.



*Figura 3.24 Selección del modelo de transporte de especies. [Autor]*

En la opción “Boundary Conditions” se presentan las entradas y salidas que se realizó en apartados anteriores.



*Figura 3.25 Condiciones de borde. [Autor]*

Se tiene diferentes opciones para poder dar la condición de borde, en este caso se opta por escoger valores de presiones de entrada y salida. De acuerdo a las figuras 3.26 y 3.27 se observa los parámetros ingresados de acuerdo a lo requerido.

Zone Name

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Reference Frame Absolute

Gauge Total Pressure (pascal) 88484

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal) 0

Direction Specification Method Normal to Boundary

Prevent Reverse Flow

**Figura 3.26** Presión absoluta en pascales de entrada de flujo. [Autor]

Zone Name

Momentum Thermal Radiation

Total Temperature (k) 288.15

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase

Specify Species in Mole Fractions

Species Mass Fractions

c3h8 0

o2 0.23

co2 0

h2o 0

**Figura 3.27** Temperatura y fracción molar de entrada de aire. [Autor]

Se realiza el mismo procedimiento de acuerdo a las entradas y con cada uno de los valores respectivos. Para dar inicio a la solución se procede con una Inicialización híbrida que viene por defecto en el programa, este tipo de inicialización realiza 10

iteraciones del resultado pero posteriormente podemos cambiar el número de iteraciones de acuerdo al caso.

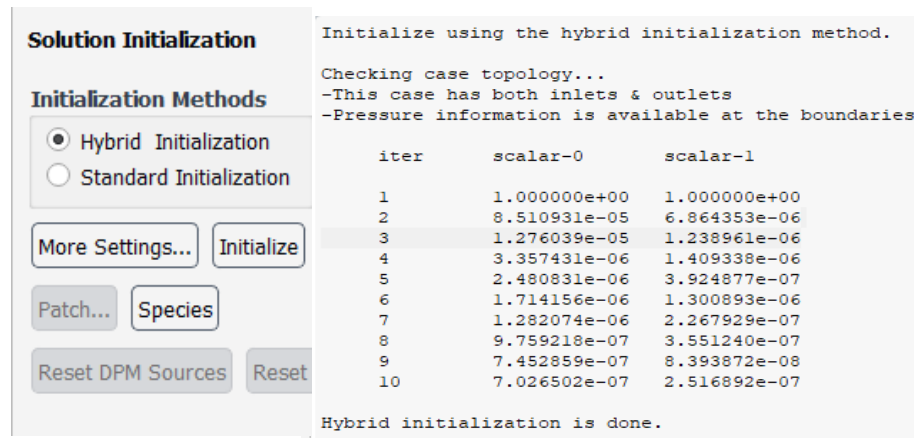


Figura 3.28 Detalles de inicialización. [Autor]

Para este caso de estudio, tomando como base Workshops de ANSYS el número de iteraciones es de 2000 con un tiempo de 0.01 segundos por iteración.

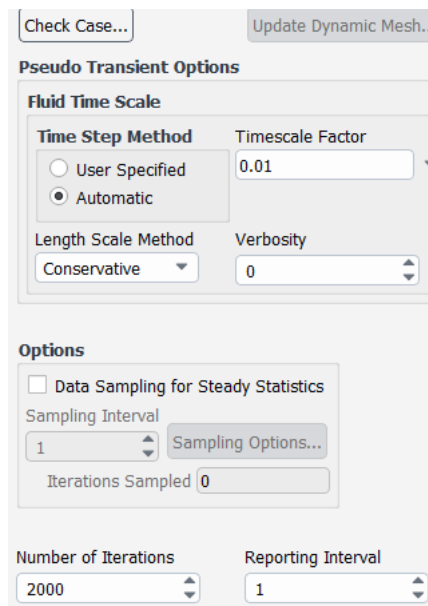
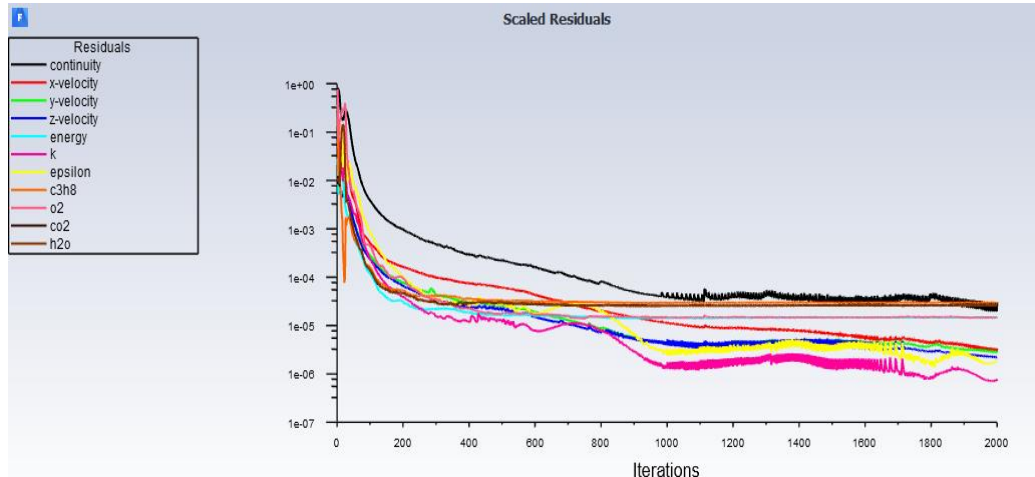


Figura 3.29 Detalles del cálculo computacional. [Autor]

Una vez finaliza la simulación se presenta una gráfica de escala residual, misma que contiene curvas de cada uno de los componentes analizados que significan que cada

una de las ecuaciones diferenciales están siendo resueltas por algún método numérico. En algún momento se encuentra la solución y la curva converge estabilizándose en la gráfica.

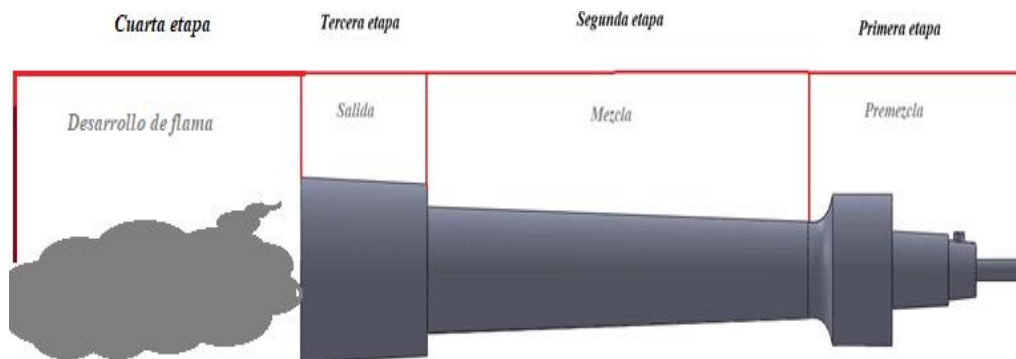


*Figura 3.30 Gráfica de escala residual. [Autor]*

### 3.5 Análisis de resultados

#### 3.5.1 Resultados de la primera etapa

Para el análisis se divide al quemador en cuatro etapas como se muestra en la figura 3.31.



*Figura 3.31 Etapas del modelo del quemador. [Autor]*

En la primera etapa se da el fenómeno de choque y mezcla de fluidos, de acuerdo a la geometría en cuanto a las entradas de fluidos, estos se mezclan dependiendo de la ubicación de los orificios, para que la premezcla ya pueda ser uniforme.

Se realiza optimizaciones geométricas con el fin de observar el comportamiento de la premezcla y las velocidades. Para estos análisis los parámetros fueron de 5 PSI entrada de presión, temperatura del gas 278 K° y aire 288 °K. (Para segunda etapa se realiza con 2 Psig).

Denominación	Valor	Unidades
Temperatura de aire y combustible	288 y 278	[°K]
Especies $C_3H_8$	1	-
Especies $O_2$ y $N_2$	0.23 y 0.77	-
Presión de entrada de aire y combustible	109168	[Pa]

**Tabla 3.11** Resultados de velocidad en la primera etapa del quemador. [Autor]

Los resultados se presentan a continuación en la tabla 3.10 de acuerdo a las diferentes variaciones geométricas realizadas para poder optimizar la mezcla. Para estos resultados se observa gráficamente perfiles de velocidades a lo largo de la primera etapa con el fin de poder escoger el modelo donde exista mayor estabilidad en la velocidad.

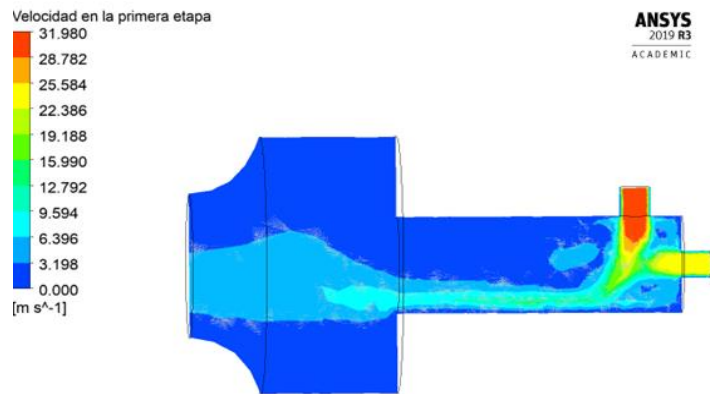
En cuanto a los porcentajes de los fluidos se presenta la tabla 3.11 y 3.12, que corresponde al propano y oxígeno respectivamente. Al igual que los resultados anteriores cada uno presenta variación geométrica de entrada. Las modificaciones geométricas tienen 5 variaciones, para la presentación de estos resultados se utilizan las 3 de mejor comportamiento de fluidos y los 2 restantes se adjuntan en los anexos como muestra de una falla en el mezclado debido a entradas de flujos insuficientes o geometrías inadecuadas (**ANEXO A-4**).



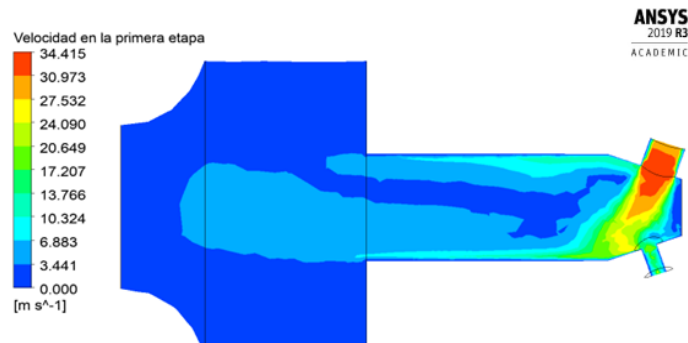


<b>Fecha de Ejecución:</b>	18/11/2020	<b>Realizado por:</b>	Jefferson Quinga
		<b>Revisado por:</b>	Ing. Santiago Cabrera
<b>Skewness Máximo</b>	0.99	<b>Skewness Mínimo</b>	3.5e-5
<b>Tiempo de Procesamiento:</b>	1h 15 min	<b>Número de Procesadores:</b>	4

**Entradas del Modelo Original**



**Entrada a 45 grados de la trayectoria**



**Entradas con aristas circulares**

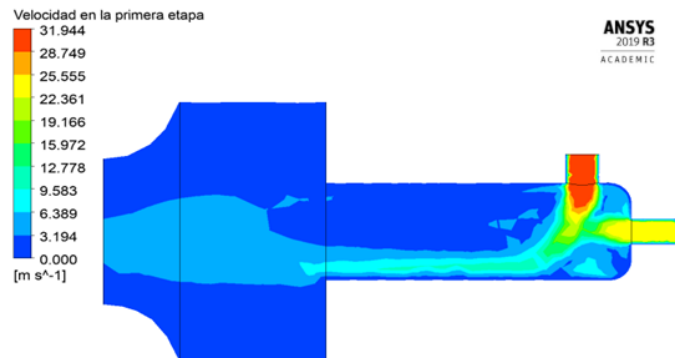
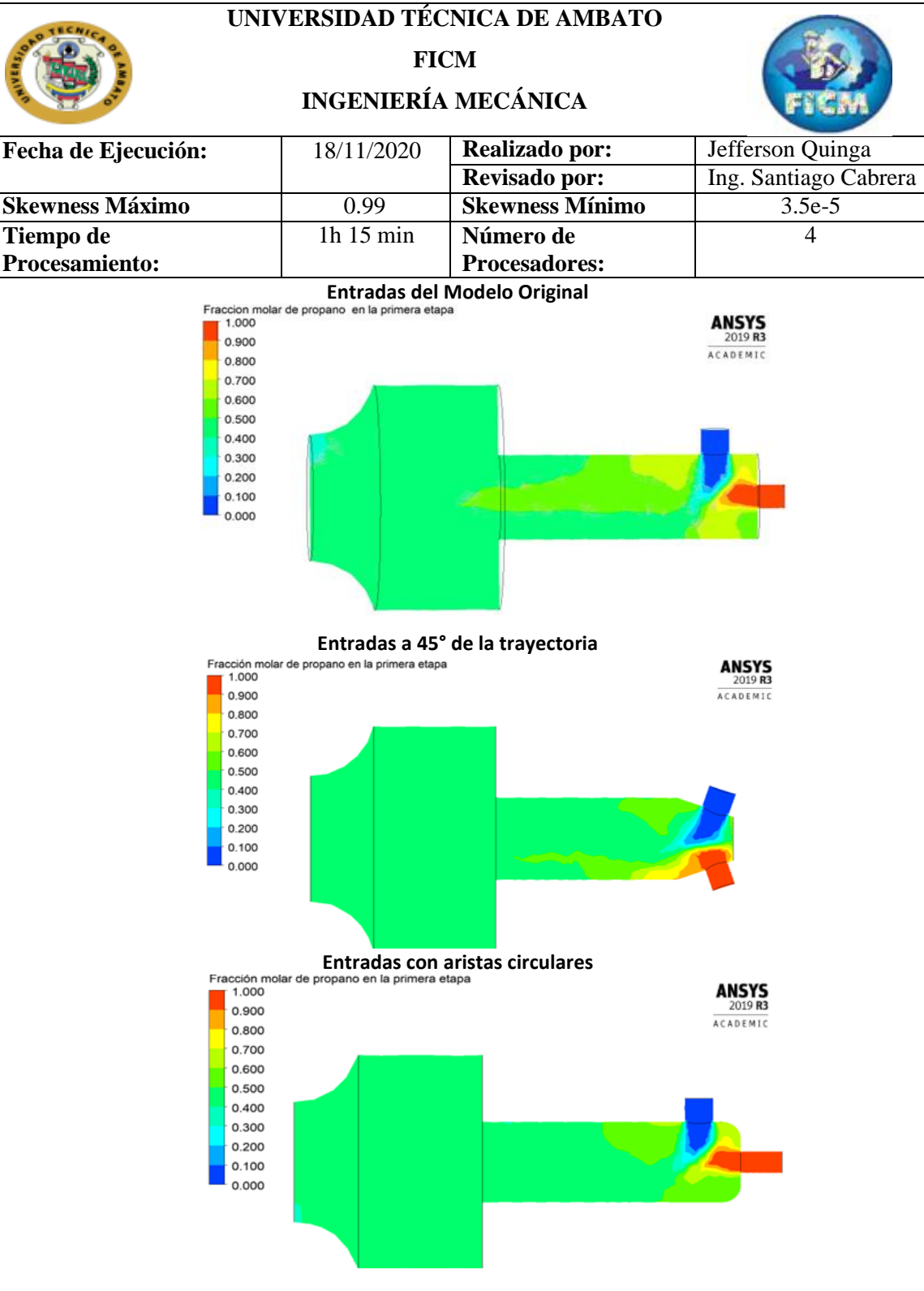


Tabla 3.12 Resultados de velocidad en la primera etapa del quemador. [Autor]



*Tabla 3.13 Resultados de porcentaje de propano en la primera etapa del quemador. [Autor]*



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FICM

INGENIERÍA MECÁNICA



<b>Fecha de Ejecución:</b>	18/11/2020	<b>Realizado por:</b>	Jefferson Quinga
		<b>Revisado por:</b>	Ing. Santiago Cabrera
<b>Skewness Máximo</b>	0.99	<b>Skewness Mínimo</b>	3.5e-5
<b>Tiempo de Procesamiento:</b>	1h 15 min	<b>Número de Procesadores:</b>	4

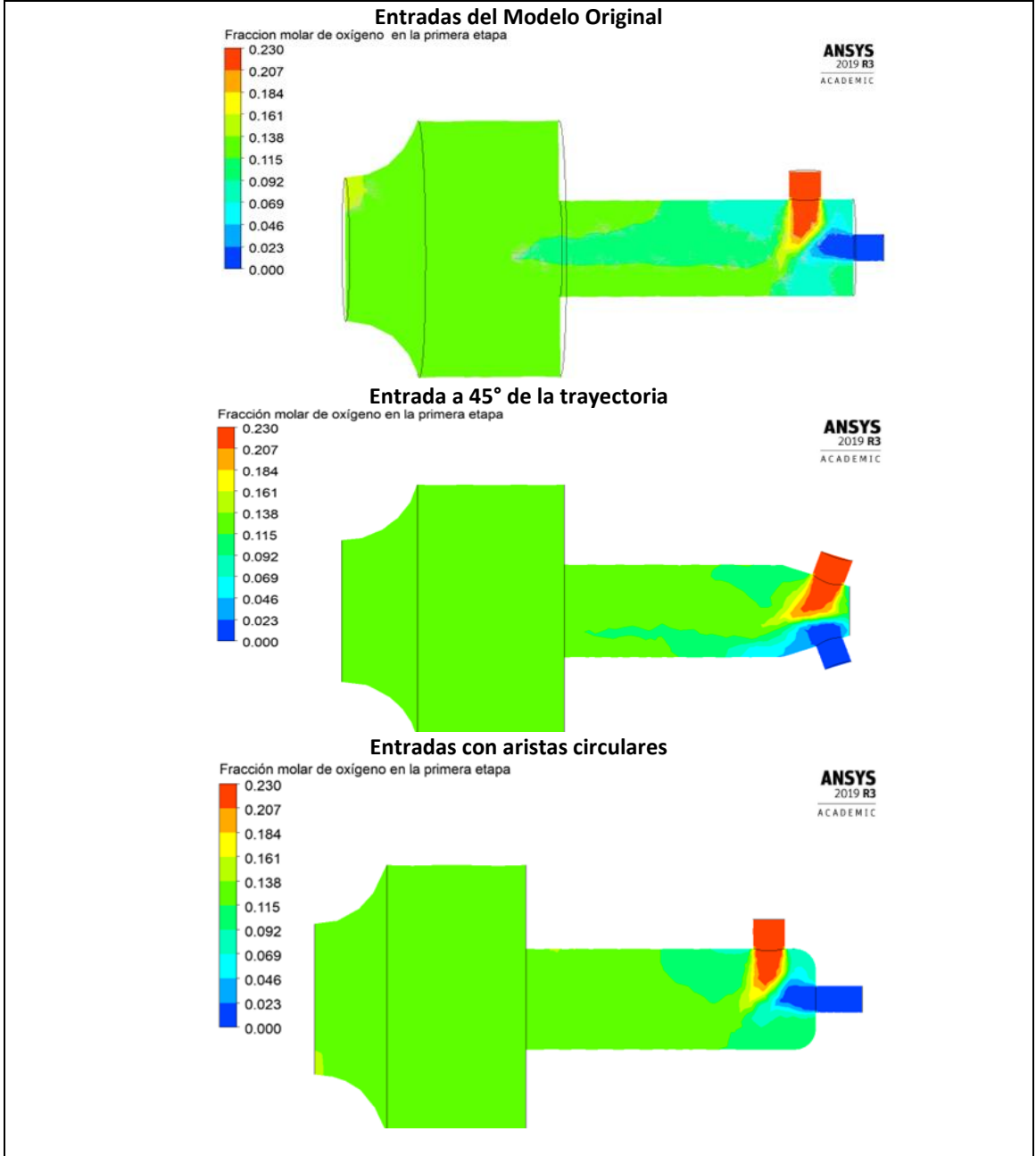
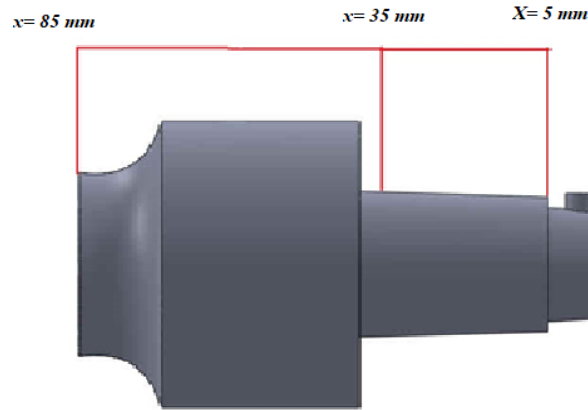


Tabla 3.14 Resultados de porcentaje de oxígeno en la primera etapa del quemador. [Autor]

### 3.5.2 Análisis de los resultados de la primera etapa

Para un análisis detallado se presenta la figura 3.32 donde se muestra las zonas donde se toma la muestra de porcentaje de propano presente, las distancias se encuentran a 5, 35 y 85 mm de donde se da el choque entre los fluidos.



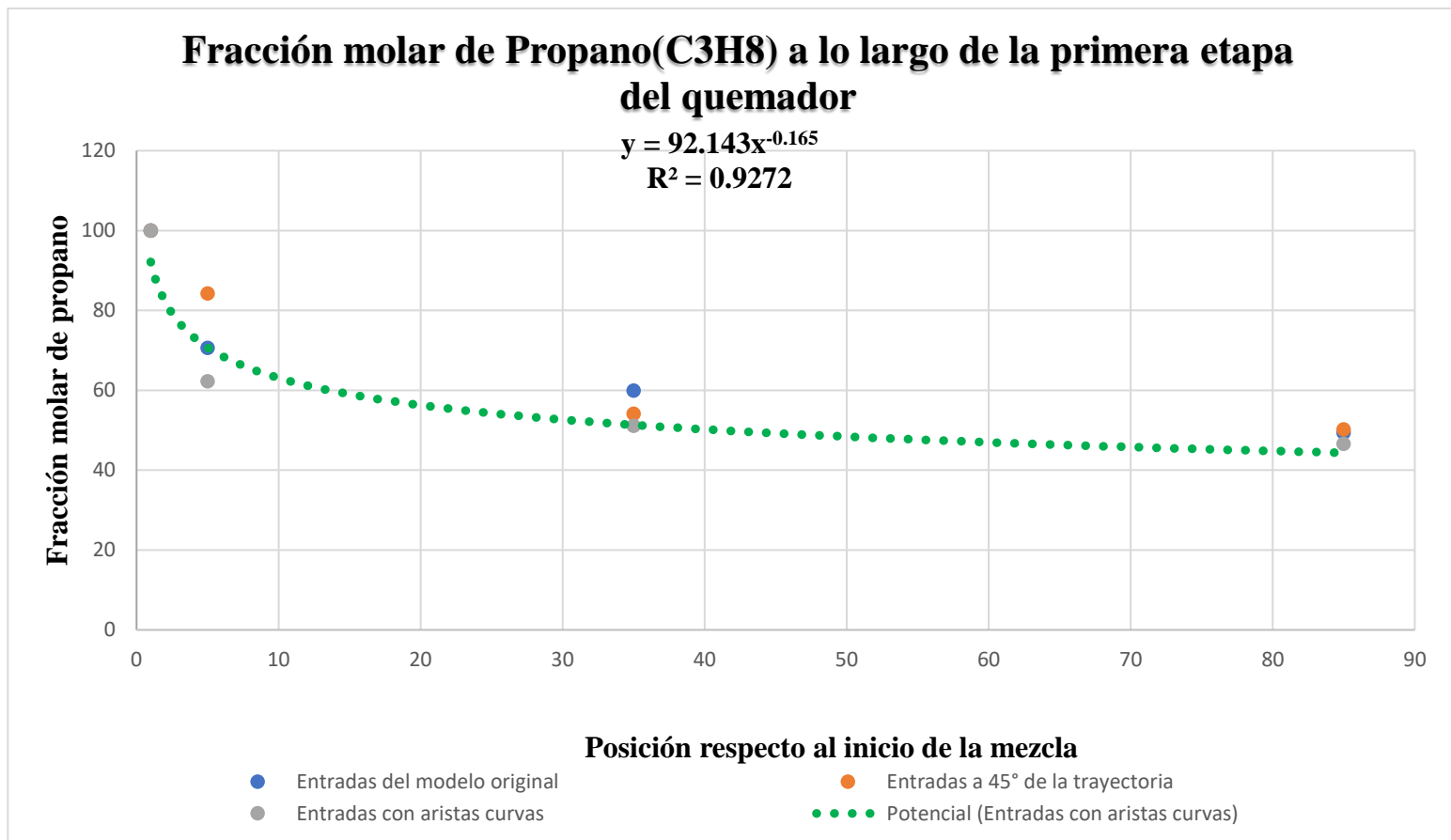
*Figura 3.32 Longitudes en la primera etapa del quemador. [Autor]*

Los datos para el análisis se presentan en la tabla 3.13 de acuerdo a las tres simulaciones presentadas anteriormente.

	<b>X = 0</b>	<b>X = 5</b>	<b>X =35</b>	<b>X = 85</b>
<b>Entradas del modelo original</b>	1	0.706	0.599	0.494
<b>Entradas a 45° de la trayectoria</b>	1	0.842	0.541	0.502
<b>Entradas con aristas curvas</b>	1	0.627	0.512	0.466

*Tabla 3.15 Resultados de fracción molar de propano en la primera etapa del quemador. [Autor]*

De acuerdo a estos datos se presenta una gráfica dispersión donde refleja el comportamiento del propano, donde se observa con claridad como el modelo con aristas curvas llega en menor longitud a una mezcla uniforme, reflejando un valor menor en la longitud de 5 mm, contrarrestando así el análisis gráfico que de igual manera muestra uniformidad para este caso. Por lo cual se opta por escoger este modelo de entrada para futuras simulaciones de segunda y tercera etapa además para poder observar el comportamiento de la flama. La línea de tendencia que más se ajusta a los datos es la potencial con un  $R^2 = 0,9272$ .



*Figura 3.33 Porcentajes de propano a lo largo del quemador. [Autor]*

### 3.5.3 Resultados de la segunda etapa

#### 3.5.3.1 Resultados de simulaciones de la segunda etapa

Se realizan 4 simulaciones con el fin de observar el comportamiento de la velocidad en el Venturi, pero se presentan resultados de dos de ellas, recalcando que son las que más se acogen a la realidad. Las dos simulaciones restantes se presentan en anexos señalando posible deficiencia en la velocidad para un desarrollo de flama adecuado. Para la primera se utiliza una presión manométrica de 2 psi y la segunda con una presión de 5 psi. Se realiza la simulación a 2 psi debido a que, para evitar problemas de vibración o ruido en cuanto al funcionamiento del quemador, inicia con esta cantidad de presión y sufre una subida gradual de presión hasta llegar a aproximadamente 5 psi con el fin de tener un desarrollo adecuado de flama. Las condiciones de borde para estas simulaciones se presentan en la tabla 3.16.

Denominación	Simulación 1	Simulación 2	Unidades
Temperatura de aire y propano	288 y 278	288 y 278	[°K]
Especies $C_3H_8$	1	1	-
Especies $O_2$ y $N_2$	0.23 y 0.77	0.23 y 0.77	-
Presiones entrada	88484	109168	[Pa]
Presión a la salida	74695	74695	[Pa]

**Tabla 3.16** Condiciones de frontera para las simulaciones de mezcla. [Autor]

Una vez realizadas las simulaciones con un numero de iteraciones de 2000 y un tiempo de 2 horas con 15 minutos se tiene los siguientes resultados que se muestran en las tablas 3.17 y 3.18. Se muestran resultados de velocidad a lo largo del tubo Venturi donde se realiza la mezcla homogénea, esta velocidad tiende a variar de acuerdo a la geometría, existiendo una expansión súbita la velocidad tiende a bajar desde la parte más estrecha a la más ancha del Venturi, además se puede observar velocidades pequeñas debido a la homogeneidad de la mezcla.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FICM

INGENIERÍA MECÁNICA



<b>Fecha de Ejecución:</b>	18/11/2020	<b>Realizado por:</b>	Jefferson Quinga
		<b>Revisado por:</b>	Ing. Santiago Cabrera
<b>Skewness Máximo</b>	0.99	<b>Skewness Mínimo</b>	3.5e-5
<b>Tiempo de Procesamiento:</b>	1h 15 min	<b>Número de Procesadores:</b>	4

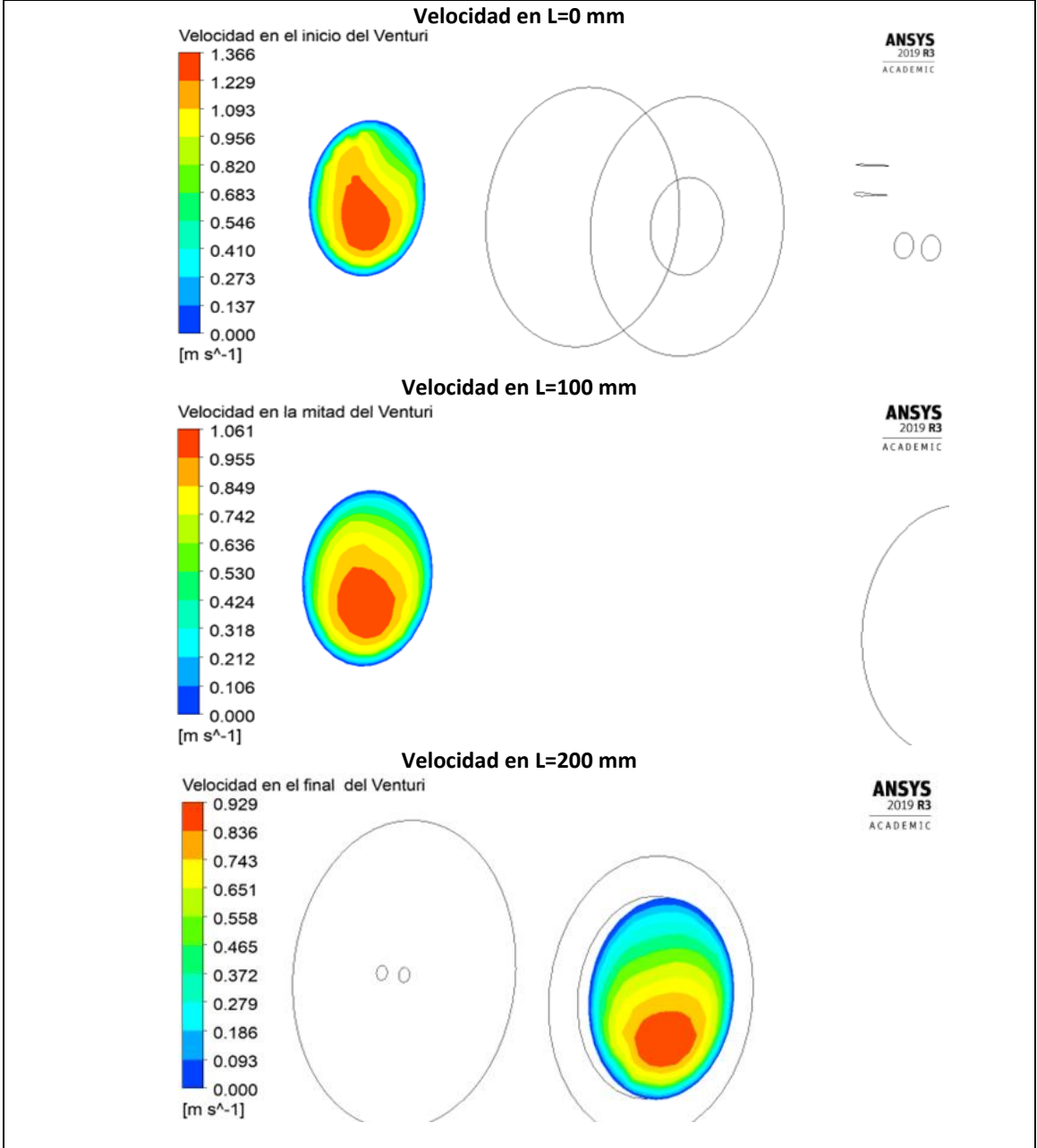


Tabla 3.17 Resultados de velocidad en la simulación 1 a lo largo del Venturi. [Autor]



<b>Fecha de Ejecución:</b>	18/11/2020	<b>Realizado por:</b>	Jefferson Quinga
		<b>Revisado por:</b>	Ing. Santiago Cabrera
<b>Skewness Máximo</b>	0.99	<b>Skewness Mínimo</b>	3.5e-5
<b>Tiempo de Procesamiento:</b>	1h 15 min	<b>Número de Procesadores:</b>	4

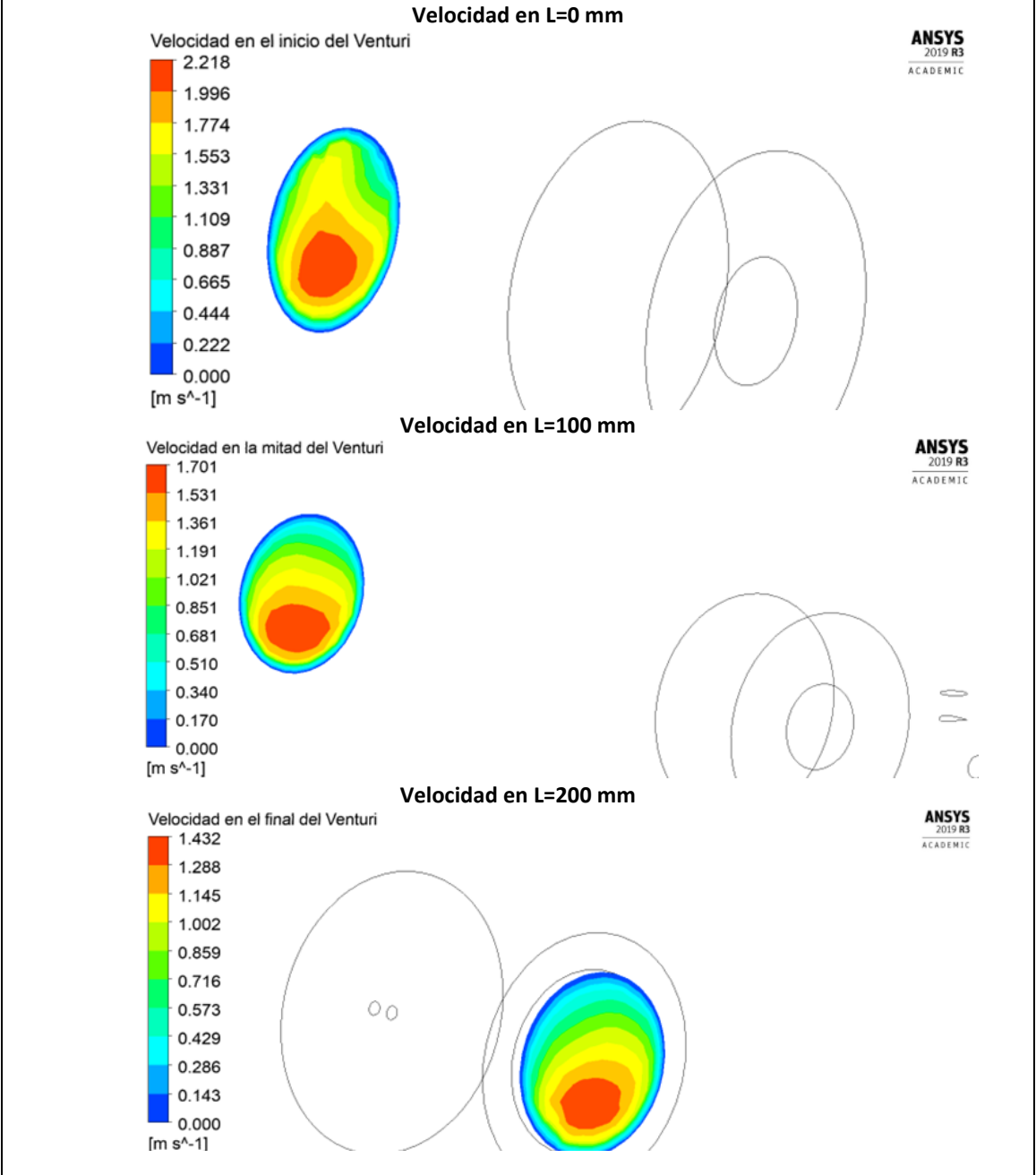


Tabla 3.18 Resultados de velocidad en la simulación 2 a lo largo del Venturi. [Autor]



### 3.5.4 Análisis de los resultados de la segunda etapa

Para un análisis más detallado se toma muestra de 5 lugares distintos a la largo del Venturi como se muestra en la imagen 3.34, con el fin de poder observar el comportamiento de la velocidad de las simulaciones con 2 y 5 psi. Los datos de las velocidades se presentan en la tabla 3.19.

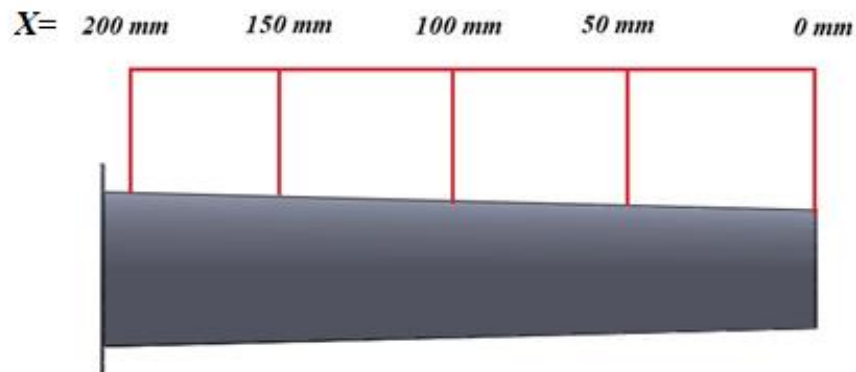
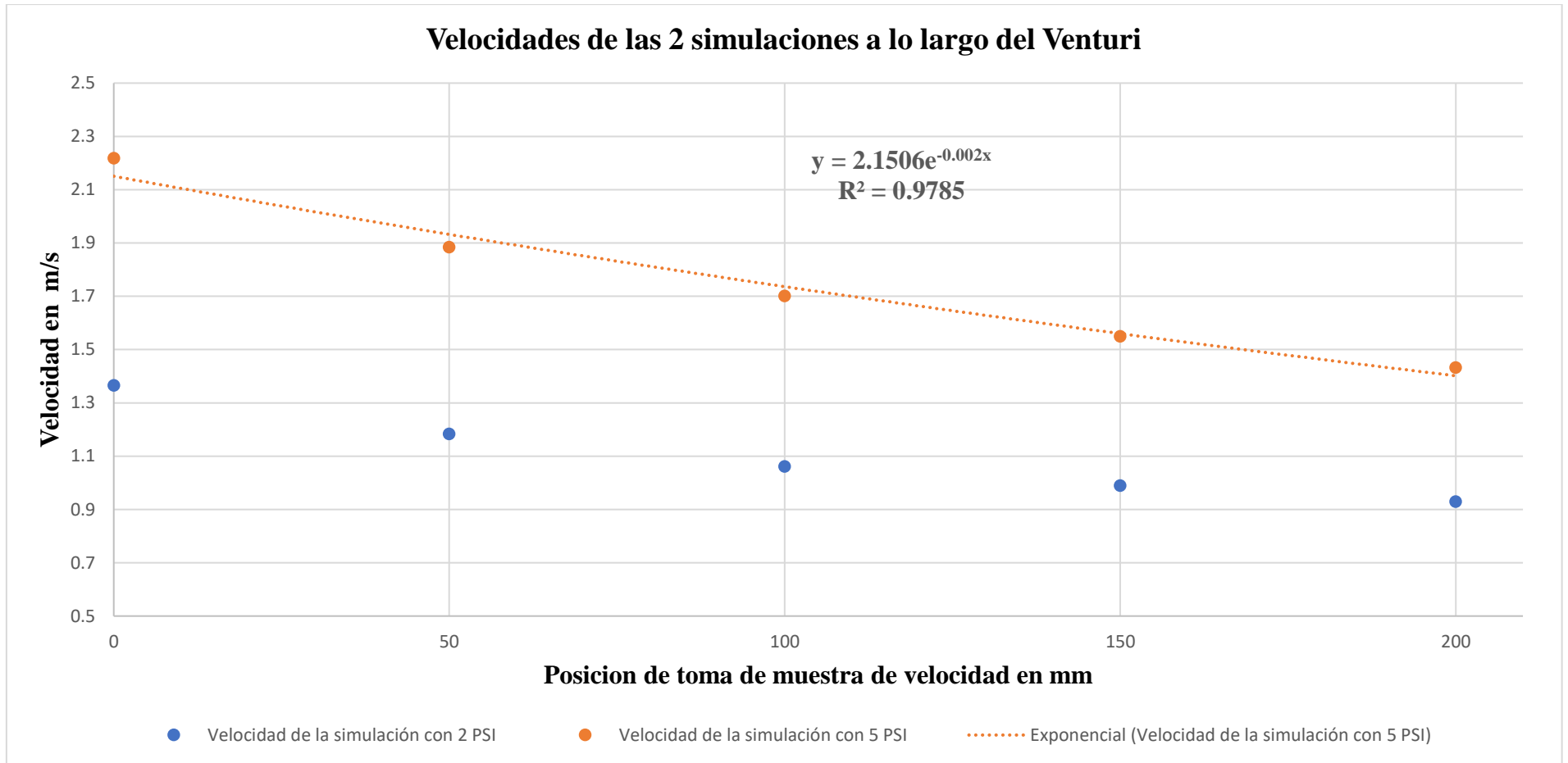


Figura 3.34 Longitudes en la segunda etapa del quemador. [Autor]

X \ V	0 mm	50 mm	100 mm	150 mm	200mm	Unidades
Velocidad de la simulación con 2 PSI	1.366	1.183	1.061	0.989	0.929	m/s
Velocidad de la simulación con 5 PSI	2.218	1.884	1.701	1.55	1.432	m/s

Tabla 3.19 Datos de velocidad a distintas posiciones en el Venturi. [Autor]

Como resultado de este análisis se tiene la gráfica 3.35, donde se observa que la velocidad no varía bruscamente, además se evidencia un decrecimiento de acuerdo a la trayectoria del fluido. Para efectos de simulaciones posteriores donde se observará el comportamiento de la flama se opta por utilizar la simulación número 2 la cual tiene velocidades relativamente más altas que la simulación 1 con el fin de poder observar un desarrollo más adecuado de flama. La línea de tendencia que más se ajusta a los datos es la exponencial con un  $R^2 = 0,9785$ .



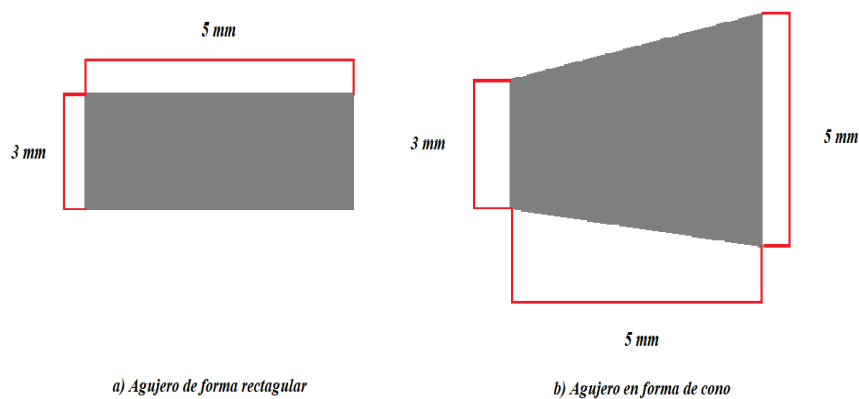
*Figura 3.35 Gráfica del comportamiento de la velocidad a lo largo del Venturi. [Autor]*

### 3.5.5 Resultados de la tercera etapa

#### 3.5.5.1 Resultados del comportamiento de la velocidad de la mezcla en el agujero de salida a la atmósfera

Para poder observar este comportamiento se realizan dos simulaciones manteniendo la mayoría de los parámetros ya mencionados con anterioridad, teniendo en cuenta los resultados de los apartados anteriores, es decir mantener aristas curvas al inicio y optar por 5 PSI, además para efectos de esta simulación se procede a variar la forma geométrica del agujero de salida de mezcla, tomando en cuenta referencias del libro “Manual del Gasista” de Lorenzo Becco, se opta por una simulación realizarla con el agujero normal de forma rectangular y la segunda simulación con un agujero de forma cónica.

Las formas geométricas de los agujeros de salida de mezcla se presentan en la figura 3.36.



**Figura 3.36** Geometría de los agujeros para simulación. [Autor]

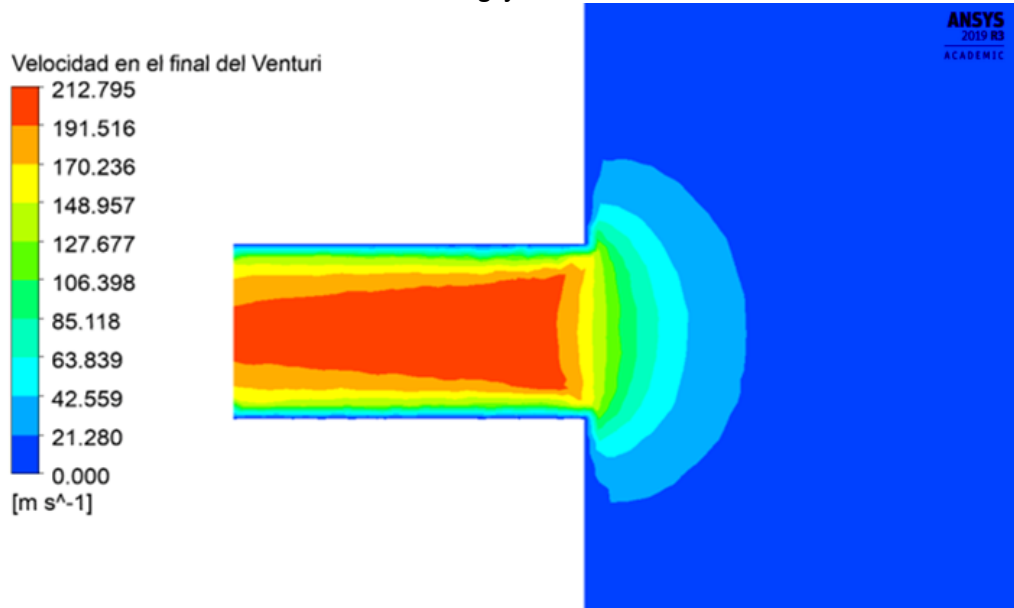
De acuerdo a estas variaciones los resultados se presentan en las tablas 3.20 y 3.21. Se procede hacer un análisis gráfico de perfiles de velocidad de vista tanto lateral como frontal del quemador. En el **ANEXO A-6** se presenta otra simulación con deficiencia de desarrollo de velocidad. Se opta por escoger el agujero uniforme rectangular ya que se desarrolla de mejor manera la velocidad.



**SIMULACIÓN DE MEZCLA DEL QUEMADOR**

<b>Fecha de Ejecución:</b>	18/11/2020	<b>Realizado por:</b>	Jefferson Quinga
		<b>Revisado por:</b>	Ing. Santiago Cabrera
<b>Skewness Máximo</b>	0.99	<b>Skewness Mínimo</b>	3.5e-5
<b>Tiempo de Procesamiento:</b>	1h 15 min	<b>Número de Procesadores:</b>	4

Vista lateral de agujero de salida mezcla



Vista frontal de agujero de salida mezcla

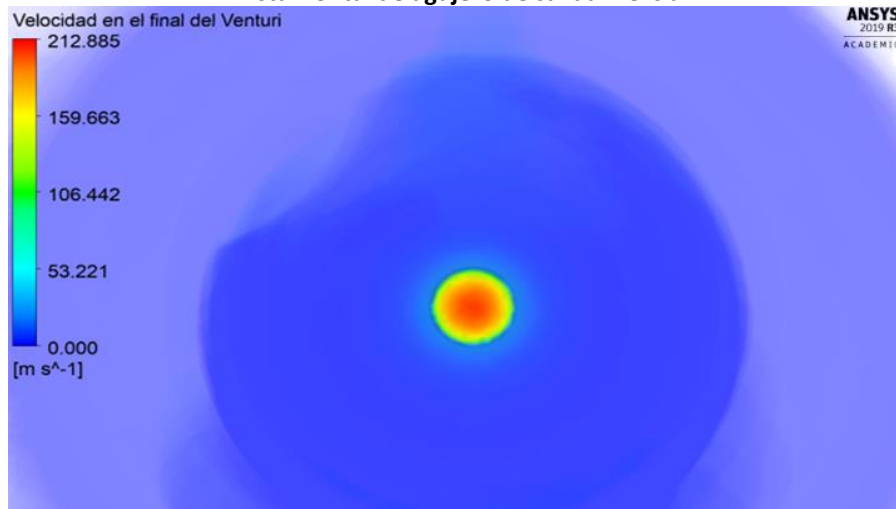


Tabla 3.20 Resultados de velocidad en la primera etapa del quemador. [Autor]



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FICM

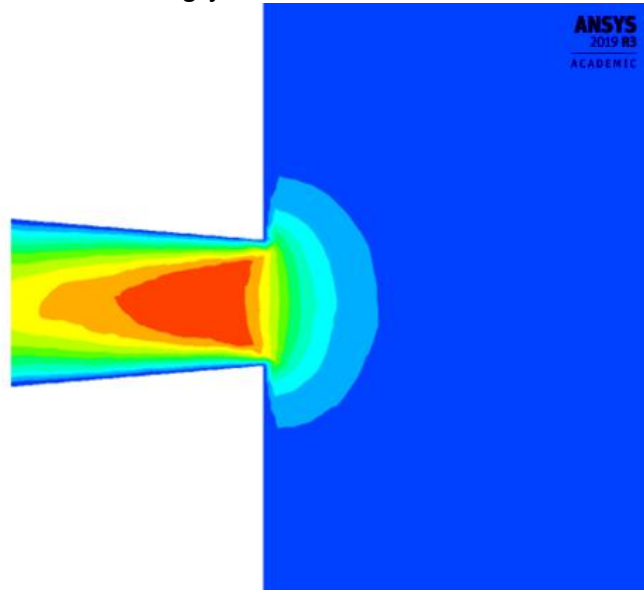
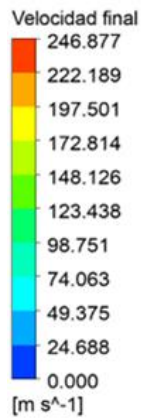
INGENIERÍA MECÁNICA



**SIMULACIÓN DE MEZCLA DEL QUEMADOR**

<b>Fecha de Ejecución:</b>	18/11/2020	<b>Realizado por:</b>	Jefferson Quinga
		<b>Revisado por:</b>	Ing. Santiago Cabrera
<b>Skewness Máximo</b>	0.99	<b>Skewness Mínimo</b>	3.5e-5
<b>Tiempo de Procesamiento:</b>	1h 15 min	<b>Número de Procesadores:</b>	4

Vista lateral de agujero de salida mezcla



Vista frontal de agujero de salida mezcla

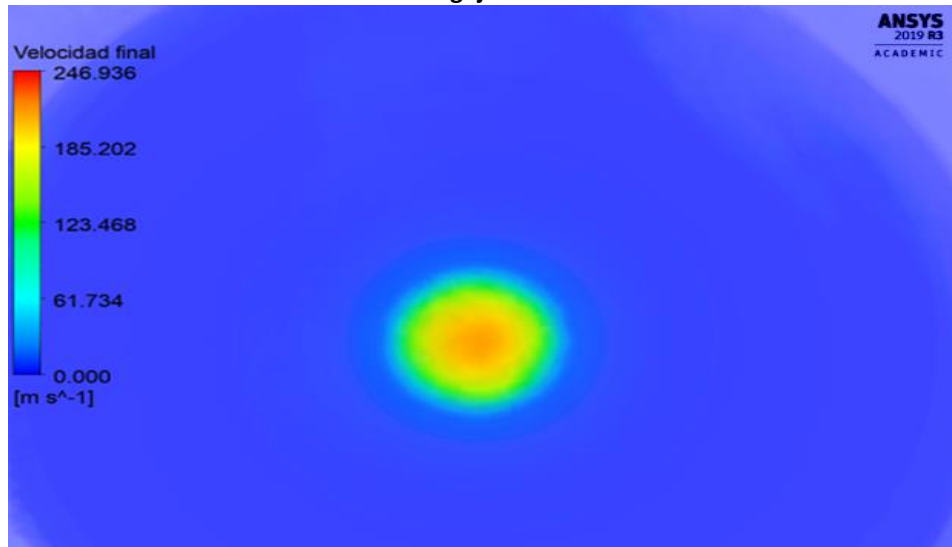
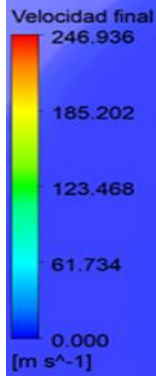


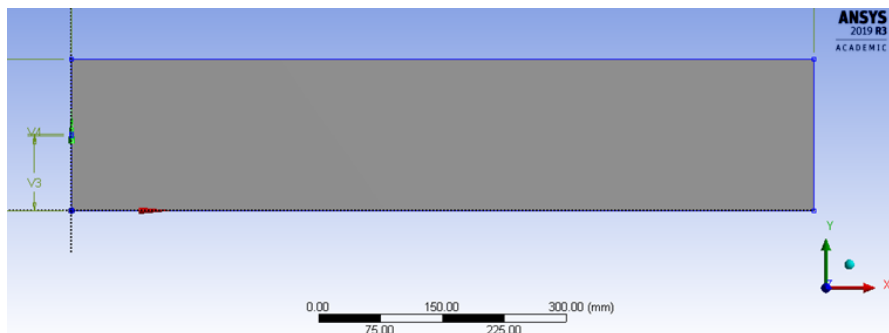
Tabla 3.21 Resultados de velocidad en la primera etapa del quemador. [Autor]

### 3.5.6 Análisis de la cuarta etapa

#### 3.5.6.1 Procedimiento para la simulación

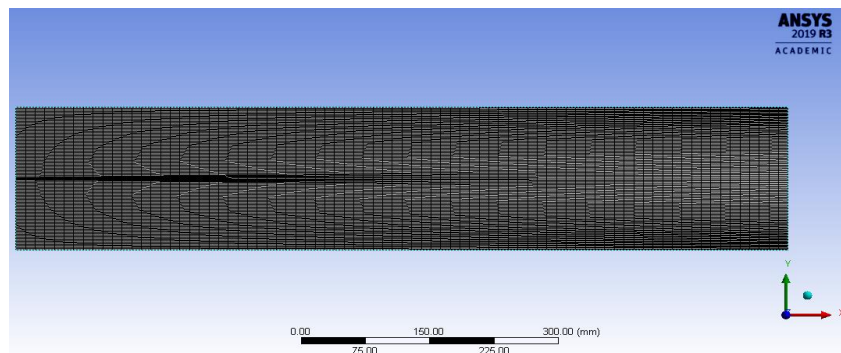
Debido a que este análisis es distinto al ya realizado de mezcla, aunque se sigue el mismo procedimiento, se presenta a continuación la geometría utilizada en la figura 3.37. Para efecto de esta simulación se opta por realizar un dominio externo con medidas de acuerdo a estimaciones de longitud y ancho de la flama. En el anexo A-7 se presenta las consecuencias de una mala estimación de longitud y ancho.

Debido a que está simulación requiere alta precisión y con el fin de tener un ahorro computacional se realizó un análisis bidimensional.



*Figura 3.37 Dominio 2D para desarrollo de flama. [Autor]*

En este caso se utiliza el CAD Desing Modeler para a partir de un croquis generar esta superficie que cuenta con una longitud de 1000 mm, un ancho de 183 mm y una parte de 3 mm que simula el agujero de salida de la mezcla. Para efecto de mallado se presenta la figura 3.38.



*Figura 3.38 Discretización de malla del dominio para flama. [Autor]*

Para obtener este mallado se aplica 3 “sizing”, el primero para la arista de 3mm donde se aplicó un “number of divitions” de 10, luego para el resto de la parte de ancho se aplicó otro “number of divitions” de 50 y por último un “number of divitions” de 90, con lo cual se obtiene una malla refinada y acorde al tipo de simulación a aplicarse. Como punto final antes de generar la malla se aplica un “Face meshing” a toda la acara del dominio.

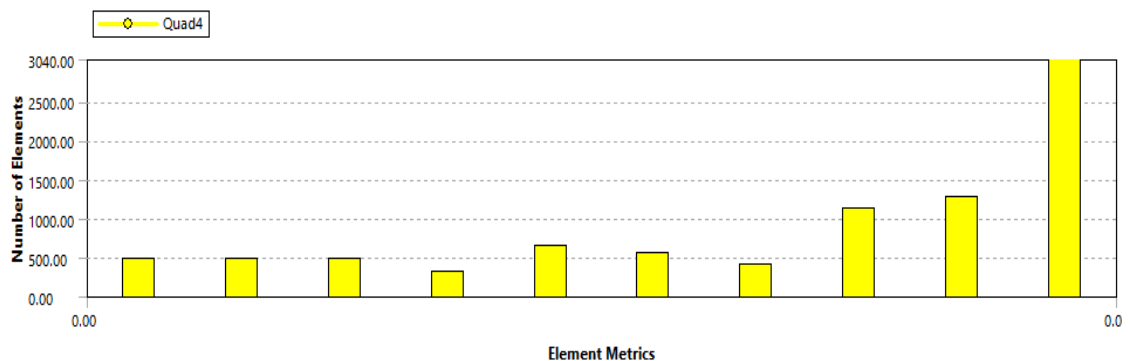
Para el estudio de convergencia de acuerdo a lo señalado en el capítulo II, donde se muestra la escala de calificación Skewness tenemos los siguientes datos.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	4.8182e-004
<input type="checkbox"/> Max	1.1058e-002
<input type="checkbox"/> Average	7.767e-003
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	3.2165e-003

**Figura 3.39** Parámetros de calificación Método Skewness. [Autor]

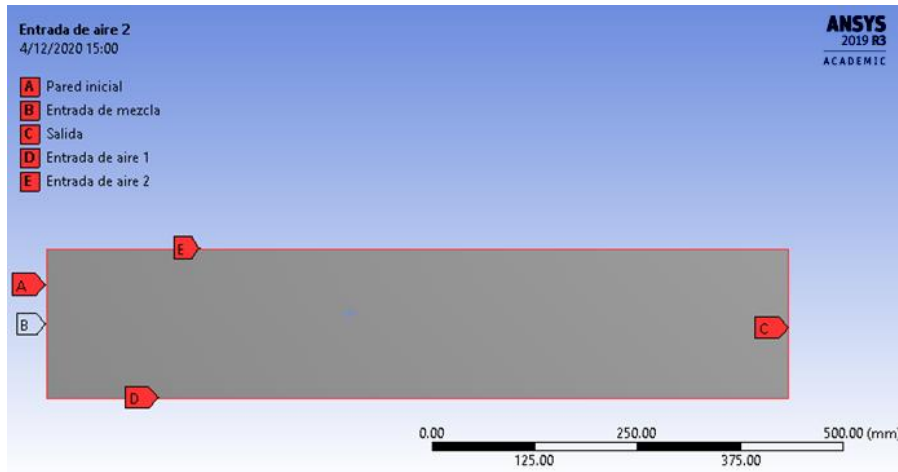
Como se muestra en la figura 3.39, se tiene un average muy cercano a cero lo que implica un grado de excelencia de calificación de métrica de malla, lo que a su vez hace que esta malla sea adecuada para su uso en Fluent.

Los detalles del Mesh metric se presentan en la figura 3.40.



**Figura 3.40** Grafica de calificación respecto al número de elementos. [Autor]

Luego se genera los “names selections” para cada condición de frontera como se muestra en la figura 3.41.



*Figura 3.41 Names selection para condiciones de entrada. [Autor]*

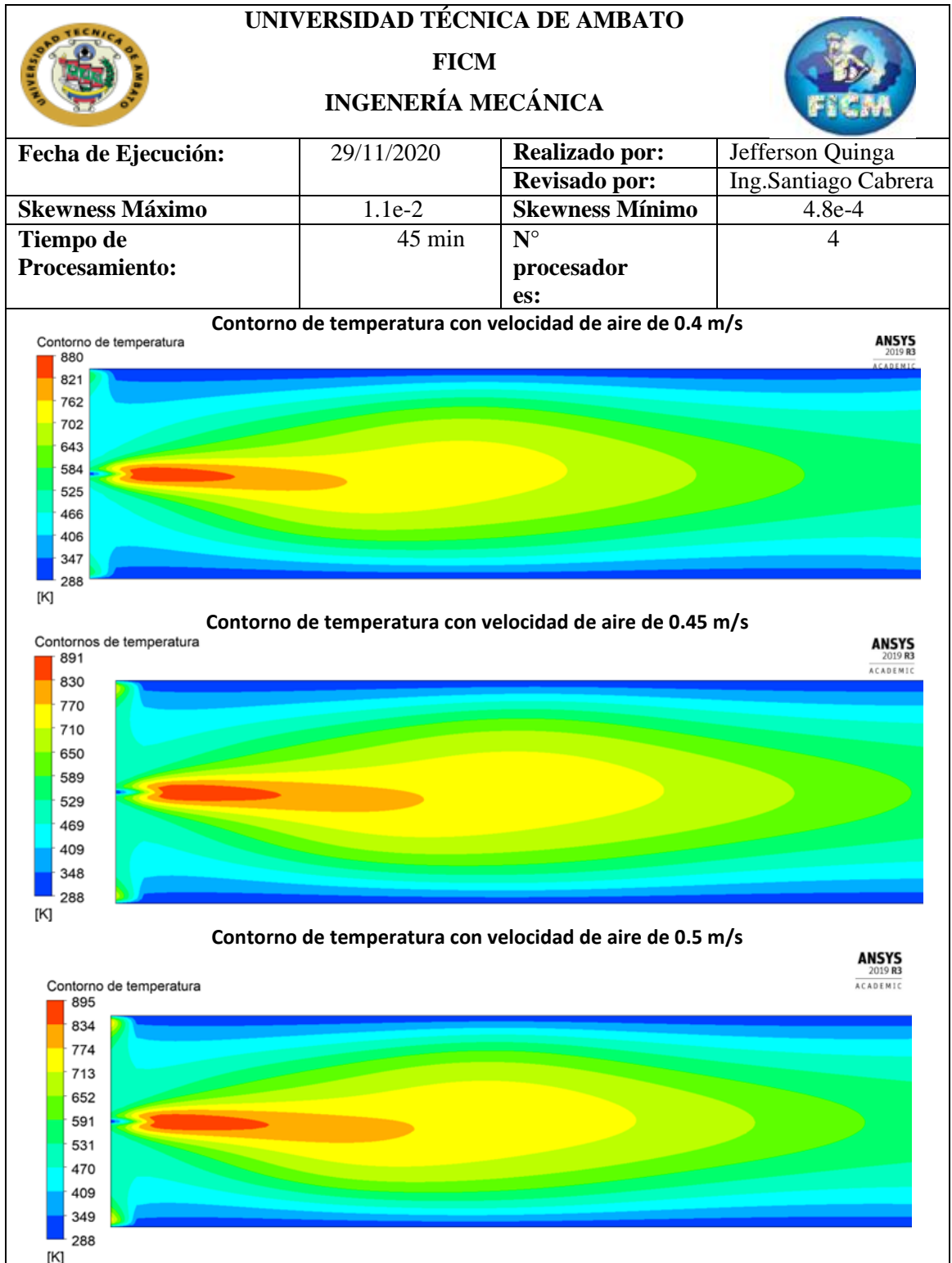
Para la configuración del Setup se toma las mismas consideraciones que el análisis de mezcla. Los resultados finales de las simulaciones de mezcla se convierten en las condiciones de borde iniciales para esta simulación. Las condiciones se presentan en la tabla 3.22. Además, se opta por distintas velocidades del viento atmosférico para poder observar su comportamiento simulando así un exceso de aire. En el **Anexo A-8** se presentan desarrollo de flamas demasiado turbulentas que no son de provecho.

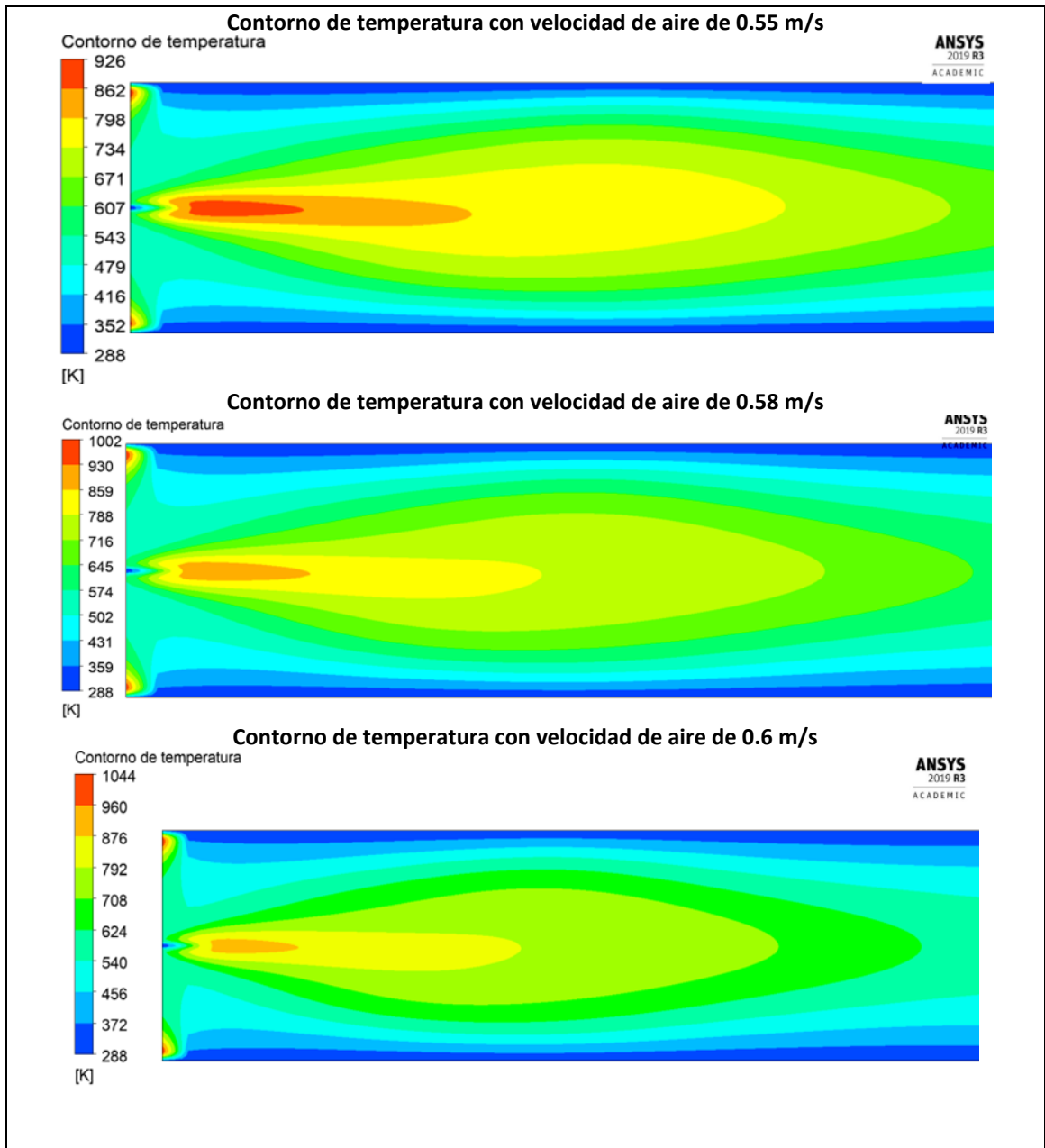
Denominación	Valor	Unidades
Velocidad de mezcla	198.94	m/s
Fracción molar propano	0.47	
Fracción molar oxígeno	0.40	
Fracción molar nitrógeno	0.13	
Densidad	1.487	kg/m <sup>3</sup>

*Tabla 3.22 Condiciones de entrada para simulación de flama. [Autor]*



### 3.5.6.2 Resultados de la cuarta etapa



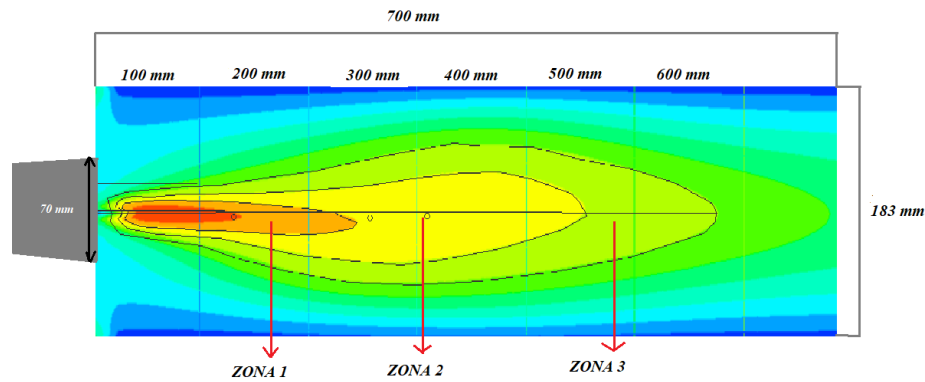


*Tabla 3.23 Resultados de los contornos de temperatura de flama. [Autor]*

### 3.5.7 Análisis geométrico de las zonas de la flama

Se utiliza un software para análisis de imagen, mismo que es un programa libre. El procedimiento consiste en generar un patrón de medida y a partir de este generar las mediciones de longitud, perímetro y área. Para este caso el patrón de medida es de 100

mm como se muestra en la figura 3.42. Además, el estudio se lleva a cabo mediante 3 zonas las cuales están señaladas en la misma figura.



**Figura 3.42** Zonas de estudio de la flama y escala utilizada. [Autor]

Estas zonas comprenden distintas temperaturas de acuerdo a la simulación realizada, las temperaturas se muestran en la tabla 3.24.

	<b>Primera zona</b>	<b>Segunda zona</b>	<b>Tercera zona</b>	<b>Unidades</b>
<b>Velocidad 0.4 m/s</b>	762-821	702-762	643-702	<b>K</b>
<b>Velocidad 0.45 m/s</b>	770-830	710-770	650-710	
<b>Velocidad 0.5 m/s</b>	774-834	713-774	652-713	
<b>Velocidad 0.55 m/s</b>	798-862	734-798	671-734	
<b>Velocidad 0.6 m/s</b>	793-876	706-792	624-706	
<b>Velocidad 0.65 m/s</b>	793-887	708-793	624-708	

**Tabla 3.24** Resultados de los contornos de temperatura de flama. [Autor]

Para este caso con el fin de poder observar que isoterma tienes mayor y menor geometría se realiza el estudio únicamente de la zona 2 debido a que esta concentra la temperatura de 700 °K, misma temperatura con la que se realizó la estimación para los cálculos de calor generado y que además dicha temperatura es considerada como la más útil para aprovechar el funcionamiento del quemador

A continuación, se presentan los resultados del estudio con cada una de las simulaciones en la tabla 3.25.

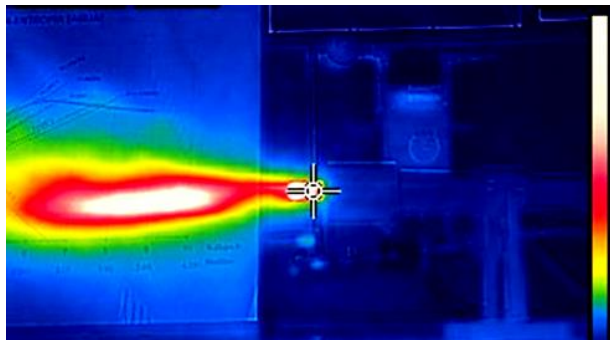
	Con V= 0,4	Con V= 0,45	Con V= 0,5	Con V= 0,55	Con V= 0,58	Con V= 0,6
Longitud [mm]	476,56	495,5	529,9	513,4	580	643,5
Perímetro [mm]	1444	1533	1650	1554	1862	1988
Área [mm <sup>2</sup> ]	17535	19775	21487	21368	29125	47224

*Tabla 3.25 Resultados del análisis geométrico de la isoterma de 700°K. [Autor]*

De acuerdo a los resultados obtenidos se tiene que la zona con mayor longitud, perímetro y área es la que se genera con una velocidad de  $0.6 \frac{m}{s}$ , en cambio la zona con menores valores es la que se genera con  $0.4 \frac{m}{s}$ , los valores con mayor valor se encuentran encerrados en color rojo mientras que los de menos valor se encuentran encerrados de color celeste.

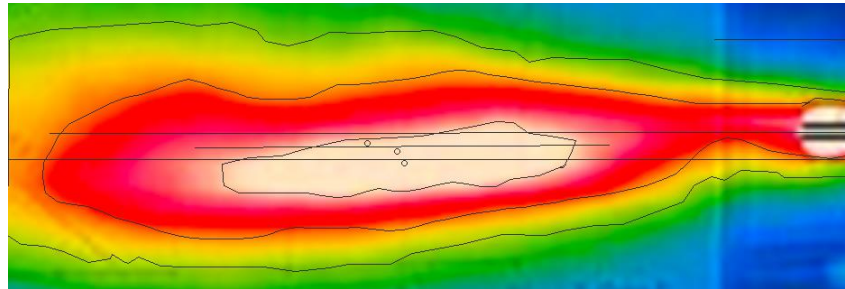
### 3.6 Validación de resultados

Para la validación de los resultados de la simulación se realiza una medición de flama del quemador que se encuentra en el laboratorio de Energía de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. La medición se realizó mediante una cámara termográfica, debido a que las cámaras que se pudo conseguir miden hasta un aproximado de 300°C, únicamente se realiza la validación con parámetros geométricos como longitud, perímetro y área tomadas con la cámara termográfica y los resultados de la simulación. A continuación, se presenta la toma de muestra de flama con 5 Psig tanto en la entrada de aire y de combustible.



*Figura 3.43 Muestra tomada de la flama del quemador del Laboratorio de Energía de la FICM con la cámara termográfica. [Autor]*

Como se muestra en la figura 3.43 se miden las 3 zonas más importantes de la flama que desarrolló el quemador, los resultados de la delimitación de zonas se muestran en la figura 3.44, mientras que los resultados que arroja el programa se presentan en la figura 3.45.

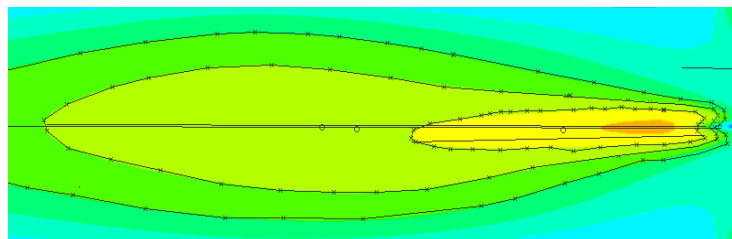


**Figura 3.44** Delimitación de las zonas de la flama tomada con una cámara termográfica. [Autor]

Measurements list						
Measurement	Area	Perime...	Length	.	..	Unit
Unidad patrón			64.242			pix...
Longitud de la...			297.660			mm
Longitud de la...			590.615			mm
Longitud de la...			623.464			mm
Area zona 2	45447.795	1280.907	586.516			mm
Area zona 3	81096.350	1459.784	615.700			mm
Area zona 1	8485.130	554.621	254.497			mm

**Figura 3.45** Resultados arrojados por el programa de las zonas obtenidas con la cámara termográfica. [Autor]

Para comparar los resultados se toma la simulación con velocidad de aire a exterior de  $0,6 \frac{m}{s}$ , debido a que es la velocidad aproximada en la ciudad de Ambato. Los resultados del análisis geométrico de la flama de simulación se presentan en las figuras 3.46 y 3.47.



**Figura 3.46** Delimitación de las zonas de la flama de simulación. [Autor]

Measurements list				
Measurement	Area	Perime...	Length	Unit
Longitud patrón			75.102	pix...
Longitud zona 1			286.181	mm
Longitud zona 2			643.795	mm
Longitud zona 3			701.483	mm
Area zona 2	47224.191	1379.278	657.650	mm
Area zona 3	82577.551	1564.477	710.238	mm
Area zona 1	8051.931	609.155	286.899	mm

*Figura 3.47 Resultados arrojados por el programa de las zonas obtenidas con la simulación. [Autor]*

Para obtener el valor exacto de cada isoterma procedemos a restar cada área grande de su área menor contenida en el interior. Los resultados geométricos de cada isoterma se presentan en la tabla 3.26.

Denominación	Flama generada por la simulación	Flama tomada por la cámara termográfica
Longitud zona 1 [mm]	286,2	297,7
Longitud zona 2 [mm]	643,8	590,6
Longitud zona 3 [mm]	701,5	623,4
Perímetro zona 1 [mm]	609,2	554,6
Perímetro zona 2 [mm]	1988	1834
Perímetro zona 3 [mm]	2943	2780
Área zona 1 [ $mm^2$ ]	8051	8485
Área zona 2 [ $mm^2$ ]	47224,2	45447,8
Área zona 3 [ $mm^2$ ]	82577	81096

*Tabla 3.26 Comparación de resultados de la flama generada por simulación y termografía. [Autor]*

### 3.6.1 Cálculo del error relativo

Con los datos de la tabla 3.26 se calcula el error relativo, teniendo los resultados que se muestran en la tabla 3.27.

<b>Error absoluto (mm)</b>	<b>Error relativo</b>	<b>Porcentaje [%]</b>
11	0.037	3.7
53	0.090	9.0
78	0.125	12.5
55	0.099	9.9
154	0.084	8.4
163	0.059	5.9
434	0.051	5.1
1777	0.039	3.9
1481	0.018	1.8

*Tabla 3.27 Resultados del error relativo. [Autor]*

De acuerdo a los resultados de la tabla 3.27 se observa que las áreas de las isothermas tienen un error relativo entre un valor menor o igual al 5%, además de las tres isothermas la zona tres es la que tiene mayor área, pero su temperatura es relativamente baja; se presenta un error elevado en cuanto a lo que refiere a perímetros de las tres isothermas al igual que en las longitudes a excepción de la primera zona que tiene un error relativo del 3,7 %.

### **3.7 Verificación de la hipótesis**

En base a los resultados obtenido de las simulaciones se puede constatar que a medida que se realizó variaciones tanto de geometría y exceso de aire el rendimiento del quemador SI mejora, en este caso la mejora se dio cuando la cámara de premezcla presentó aristas curvas, en cuanto al exceso de aire se pudo observar que mayor velocidad se consigue una isoterma de 700°K más grande a comparación de una velocidad relativamente baja.

## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

- Para el modelado del quemador para la simulación, se consideró todo el cuerpo del quemador a excepción del tubo de pilotaje, se evaluaron variaciones en geometría y ubicación de los orificios de entrada de fluidos, en la zona de premezcla, se obtiene una mezcla uniforme 47% propano y 53% aire con una configuración de aristas curvas.
- Se realizó el modelo de discretización de malla obteniendo el volumen interno del quemador, para la simulación de mezcla, además se generó un dominio externo en base a estimaciones y medidas de la parte exterior del quemador para la simulación de flama, dando como resultado para el primer caso un valor de “average” de 0,229 con el cual de acuerdo a la escala de calificación “Skewness” se encuentra en la calificación más alta, es decir cumple con la excelencia. En cuanto para el segundo caso obtenemos un valor de  $7,7 \times 10^{-3}$ , valor muy cercano a cero que de igual manera cumple con el requisito de tener la calificación más alta debido a la importancia del proyecto a realizar. Con esto se garantiza una simulación con resultados acorde a la necesidad.
- Se realizaron las 6 simulaciones de comportamiento de flama manteniendo el flujo de combustible constante y suministrando un exceso progresivo de aire en el exterior, dando como resultado que con  $0,6 \frac{m}{s}$  de velocidad de aire se obtuvo una adecuada combustión, teniendo un área de  $47224,2 \text{ mm}^2$  en la isoterma de  $700^\circ\text{K}$  y alcanzando una temperatura máxima de  $1044^\circ\text{K}$  en la zona más caliente corroborando la teoría que a medida de mayor exceso de aire se logra una combustión completa en relación a cuando el aire está en poca proporción. Además, se realizaron simulaciones de premezcla, mezcla y salida de fluido con el fin de poder observar el comportamiento de fluidos en el



interior del quemador donde con una presión de 5 Psi se obtuvo valores de velocidad a la salida del orificio de  $198 \frac{m}{s}$  y obteniendo una mezcla homogénea antes del primer tercio del quemador.

- Para la validación de resultados se optó por comparar la simulación que mayor isoterma de 700 °K tenía con los resultados de termografía de la flama del quemador del Laboratorio de Energía de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, observando valores cercanos o menores a un valor de error relativo de 5 % en la parte de las áreas de las tres isotermas que se analizaron; caso contrario a los perímetros y longitudes transversales de las isotermas donde se observa valores mayores al 5 %, que al mismo tiempo se encuentran cercanos o menores al 10 % del error relativo.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Desarrollar las simulaciones en una computadora con altas propiedades de Hardware debido a que el estudio en ANSYS Fluent genera un alto gasto computacional debido a que el programa utiliza la tarjeta gráfica además de la memoria RAM para la resolución de la simulación.
- Aplicar malla refinada en las zonas más críticas y un número de iteraciones cercano a 1500 para poder obtener resultados muy cercanos a la realidad y que exista convergencia en la gráfica de escala residual del software.
- Plantear para futuras investigaciones modificaciones geométricas que permitan analizar el comportamiento de los fluidos tanto a la entrada como salida del quemador con el fin de tener mejor homogeneidad en la mezcla.
- Sería importante complementar este trabajo para isotermas de valores altos y validarlos con el uso de cámaras termográficas de capacidad superior a 700 K.
- Realizar estudios en 2D debido a que genera un menor gasto computacional en especial en el momento de realizar la discretización de malla, al mismo tiempo arroja resultados muy válidos y correctos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. A. S. y. M. G. Y. S. Martínez, "ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN EN UN QUEMADOR INDUSTRIAL CON DOBLE CORONA", *MEMORIAS DEL XVI CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*, pp. 3-5, 2011.
- [2] M. R. Á. A. R. Barrón, "ESTUDIO NUMERICO DE LA COMBUSTION EN UN COMBUSTOR ANULAR TIPO CANASTA", pp. 3-5, 2017.
- [3] D. F. H. M. y. A. V. S. A. G. V. Guzmán, "SIMULACIÓN NÚMERICA EN CFD DE UN QUEMADOR DE FLAMA DIFUSA UTILIZANDO BIOGÁS", pp. 1-3, 2015.
- [4] F. E. B. y. A. Z. J. D. R. Martínez, "Análisis y mejora mediante CFD de un quemador atmosférico de doble corona", *MEMORIAS DEL XXV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*, pp. 2-4, 2019.
- [5] H. D. Y. a. R. A. Freedman, "The First Law of Thermodynamic", *University Physics*, vol. XII, pp. 3-5, 2012.
- [6] S. P. Surya, "THE SECOND LAW OF THERMODYNAMICS", *Indian Institute of Engineering Science and Technology*, pp. 5-8, 2020.
- [7] K. Graham, "Heat transfer introduction", 2018.
- [8] Y. C. y. G. J, TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA, Mexico, Mc Graw Hill, 2011, pp. 849-853.
- [9] I. Martinez, TERMODINAMICA BASICA Y APLICADA, Mexico, 2006, pp. 23-28.
- [10] B. V. y. B. V. M. B. P. Cristina, "Principios básicos de la Combustión", Universidad Politécnica de Valencia, pp. 4-7.

- [11] B. José, "DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LLAMA LAMINAR EN UN QUEMADOR DE PREMEZCLA", vol. Perú, pp. 35-40, 2015.
- [12] L. Becco, Manual del Gasista, Madrid, 1980.
- [13] HERLOGAS, "Quemadores industriales Herlo", [En línea]. Available: <http://www.herlogas.com/es/quemadores-industriales-rampas-gas-armarios-componentes.php>.
- [14] M. S. H. y. F. Y. N. M. S. Shah, "Future Prospect Analysis of Liquefied Petroleum Gas (LPG) and Liquefied Natural Gas (LNG) in Bangladesh: Economic and Technological Case Studies", vol. 12, p. 7, 2016.
- [15] P. S. Dhakar, "CFD Analysis of Air Conditioning in Room Using Ansys Fluent", *Research*, pp. 2-4, 2018.
- [16] Ansys, "Ansys Meshing Solution", 2015. [En línea]. Available: <https://www.ansys.com/products/platform/ansys-meshing?fbclid=IwAR06pPFTyH7PxXmG1eZNVrFB1pSKi9baW41KxNsjffK5vKbTCx9Wt5HVr3w..>
- [17] H. P. y. P. V. Jeyakarthikeyan, "Mesh convergence study and estimation of discretization error of mesh", *International conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME 2018)*, pp. 1-2, 2018.
- [18] A. Inc, Mesh Quality, [En línea]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node167.htm>. [Último acceso: 2020 october 2020].
- [19] Bibing, "Solución en Paralelo de las Ecuaciones de Navier-Stokes", de *Método de volúmenes finitos*, pp. 4-6.
- [20] A. Inc, ANSYS Fluent User's Guide, de *Ansys Fluent*, 2013, pp. 988-1012.

- [21] D. Fuentes, "Simulación Numérica del Proceso de mezclado de fluidos de la cámara de combustión", *CEDESI*, pp. 10-12, 2017.

## ANEXOS

### ANEXO A-1: Catálogo Herlogas

#### QUEMADORES HERLO

##### CATACTERÍSTICAS TÉCNICAS

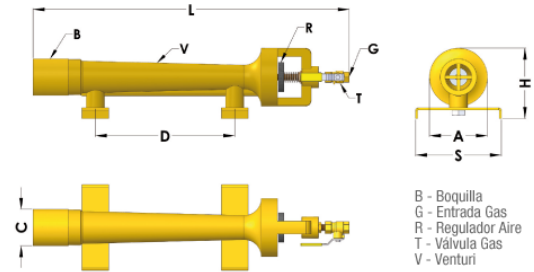
- Tipo de Quemador: Atmosférico
- Presión máxima de alimentación: 2,5 Bar
- Combustibles: Gas Natural o GLP
- Encendido manual
- Construcción robusta

##### EQUIPAMIENTO

- Válvula manual
- Soportes para su instalación (plegables)

##### REQUISITOS DE LA INSTALACIÓN

- Alimentación de Gas de 0,5 a 2 Bar



MODELO QUEMADOR	CUERPO HERLO	POTENCIA MÁXIMA		CONSUMOS MÁXIMOS GAS Ø Inyector				PRESIONES TRABAJO		DIMENSIONES QUEMADOR							
		Kw	Kcal/h	NATURAL		PROPANO		MÍNIMA mbar	MÁXIMA mbar	A mm.	C mm.	L mm.	D mm.	S mm.	H mm.	G rosca gas	PESO Kg.
				m³/h	Ømm.	Kg/h	Ømm.										
QH-20	06	20	17.200	2,10	1,2	1,56	1,0	100	2.000	45	33	305	85	80	60	20x150	1,1
QH-40	10	40	34.400	4,21	1,5	3,12	1,2	100	2.000	58	40	355	113	100	71	20x150	1,75
QH-80	15	80	68.800	8,42	2,25	6,25	1,75	100	2.000	85	55	500	195	130	90	20x150	3,6
QH-160	20	160	137.600	16,84	3,0	12,50	2,5	100	2.000	110	68	615	260	160	115	20x150	7,3
QH-320	25	320	275.200	33,68	4,25	25,0	3,25	100	2.000	140	82	750	328	200	130	½" GAS	13,6

### ANEXO A-2: Propiedades de los gases ideales

**TABLA A-1**

Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico

Sustancia	Fórmula	Masa molar, M kg/kmol	Constante de gas, R kJ/kg · K*
Agua	H <sub>2</sub> O	18.015	0.4615
Aire	—	28.97	0.2870
Alcohol etílico	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46.07	0.1805
Alcohol metílico	CH <sub>3</sub> OH	32.042	0.2595
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	17.03	0.4882
Argón	Ar	39.948	0.2081
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.115	0.1064
Bromo	Br <sub>2</sub>	159.808	0.0520
n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.124	0.1430
Cloro	Cl <sub>2</sub>	70.906	0.1173
Cloroformo	CHCl <sub>3</sub>	119.38	0.06964
Cloruro metílico	CH <sub>3</sub> Cl	50.488	0.1647
Criptón	Kr	83.80	0.09921
Diclorodifluorometano (R-12)	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	120.91	0.06876
Diclorofluorometano (R-21)	CHCl <sub>2</sub> F	102.92	0.08078
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44.01	0.1889
Dióxido de sulfuro	SO <sub>2</sub>	64.063	0.1298
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	0.2765
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.054	0.2964
Helio	He	4.003	2.0769
n-Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.179	0.09647
Hidrógeno (normal)	H <sub>2</sub>	2.016	4.1240
Metano	CH <sub>4</sub>	16.043	0.5182
Monóxido de carbono	CO	28.011	0.2968
Neón	Ne	20.183	0.4119
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28.013	0.2968
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	44.013	0.1889
Oxígeno	O <sub>2</sub>	31.999	0.2598
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	0.1885
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.081	0.1976
Tetracloruro de carbono	CCl <sub>4</sub>	153.82	0.05405

ANEXO A-3: Entalpías de formación de productos y reactivos

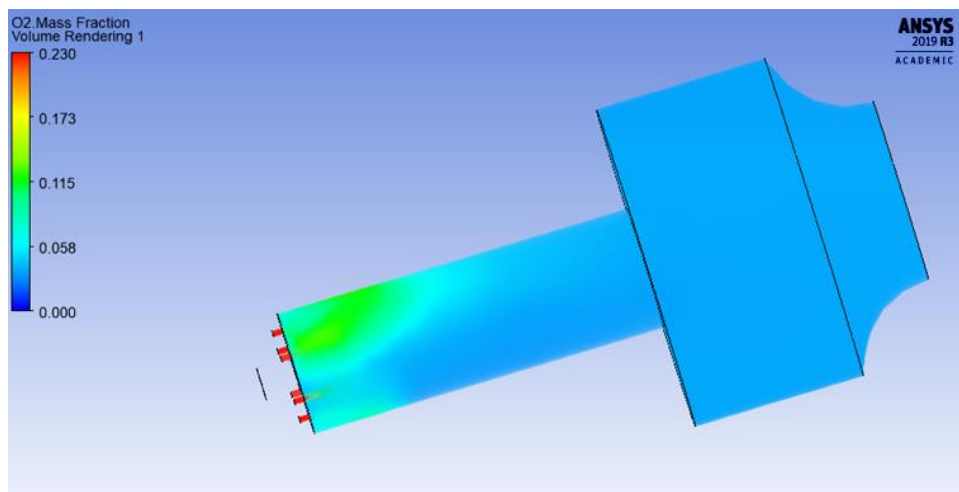
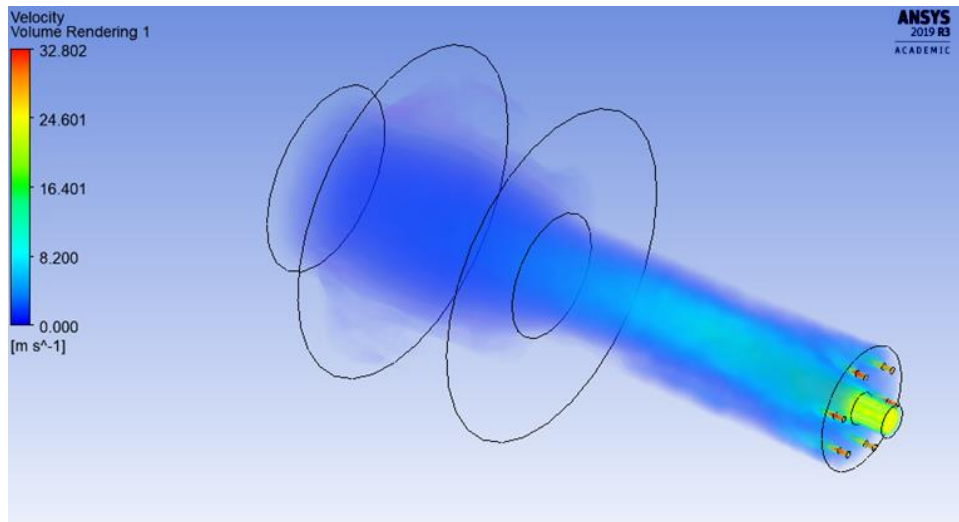
**TABLA A-26**

Entalpía de formación, función de Gibbs de formación y entropía absoluta a 25°C, 1 atm

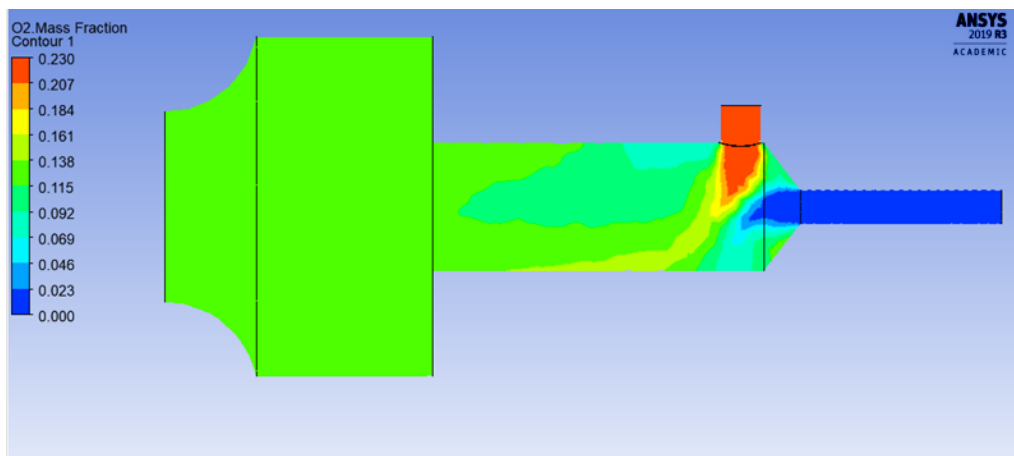
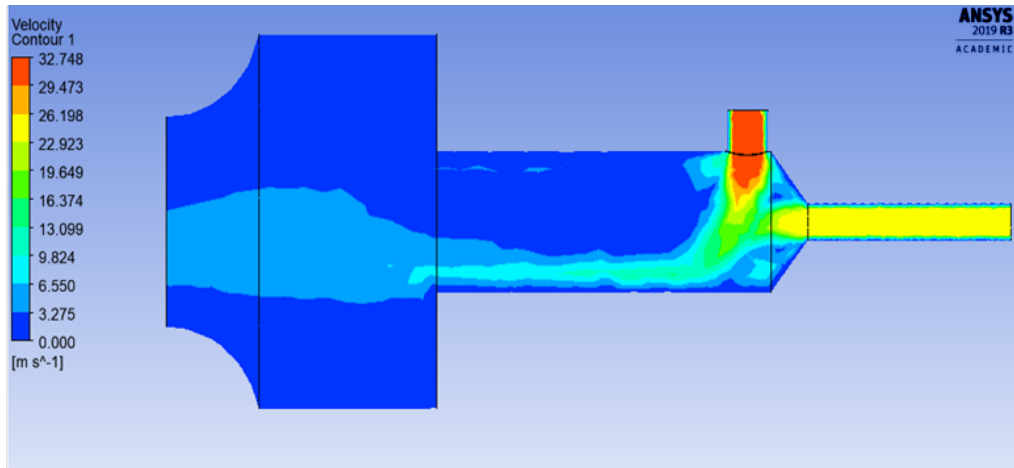
Sustancia	Fórmula	$\bar{h}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{g}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K
Acetileno	$C_2H_2(g)$	+226,730	+209,170	200.85
Agua	$H_2O(l)$	-285,830	-237,180	69.92
Alcohol etílico	$C_2H_5OH(g)$	-235,310	-168,570	282.59
Alcohol etílico	$C_2H_5OH(l)$	-277,690	-174,890	160.70
Alcohol metílico	$CH_3OH(g)$	-200,670	-162,000	239.70
Alcohol metílico	$CH_3OH(l)$	-238,660	-166,360	126.80
Amoniaco	$NH_3(g)$	-46,190	-16,590	192.33
Benceno	$C_6H_6(g)$	+82,930	+129,660	269.20
n-butano	$C_4H_{10}(g)$	-126,150	-15,710	310.12
Carbón	$C(s)$	0	0	5.74
Dióxido de carbono	$CO_2(g)$	-393,520	-394,360	213.80
n-dodecano	$C_{12}H_{26}(g)$	-291,010	+50,150	622.83
Etano	$C_2H_6(g)$	-84,680	-32,890	229.49
Etileno	$C_2H_4(g)$	+52,280	+68,120	219.83
Hidrógeno	$H_2(g)$	0	0	130.68
Hidrógeno	$H(g)$	+218,000	+203,290	114.72
Hidróxilo	$OH(g)$	+39,460	+34,280	183.70
Metano	$CH_4(g)$	-74,850	-50,790	186.16
Monóxido de carbono	$CO(g)$	-110,530	-137,150	197.65
Nitrógeno	$N_2(g)$	0	0	191.61
Nitrógeno	$N(g)$	+472,650	+455,510	153.30
n-octano	$C_8H_{18}(g)$	-208,450	+16,530	466.73
n-octano	$C_8H_{18}(l)$	-249,950	+6,610	360.79
Oxígeno	$O_2(g)$	0	0	205.04
Oxígeno	$O(g)$	+249,190	+231,770	161.06
Peróxido de hidrógeno	$H_2O_2(g)$	-136,310	-105,600	232.63
Propano	$C_3H_8(g)$	-103,850	-23,490	269.91
Propileno	$C_3H_6(g)$	+20,410	+62,720	266.94
Vapor de agua	$H_2O(g)$	-241,820	-228,590	188.83

**ANEXO A-4:** Muestra de una falla en la primera etapa debido a entradas de flujos insuficientes o geometrías inadecuadas

- Con 6 orificios de entrada de aire

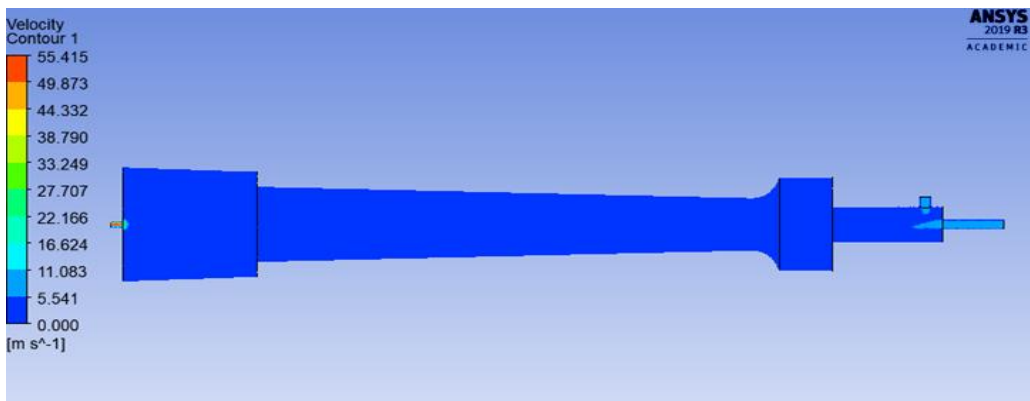


- Con aristas a 45° en la premezcla



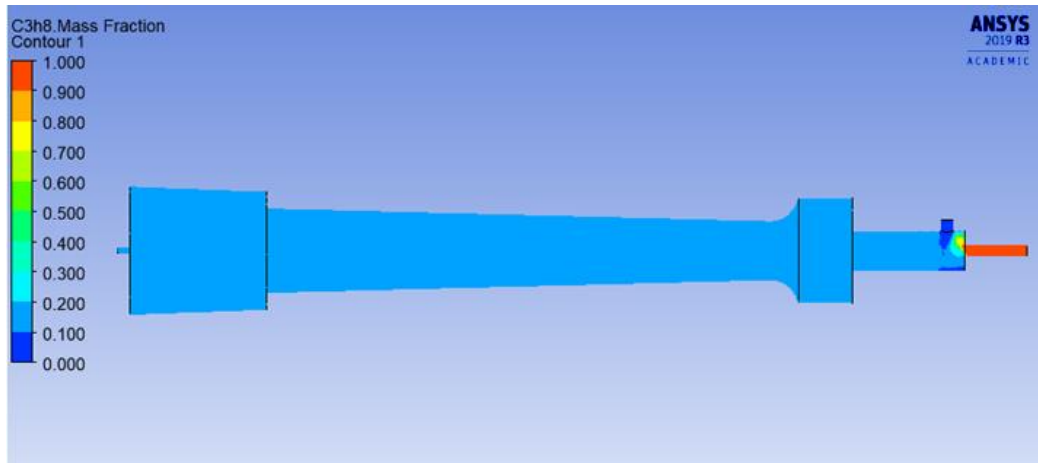
**ANEXO A-5: Inadecuada velocidad en la segunda etapa (Mezcla) para desarrollo de flama**

- Simulación con flujos pequeños (Velocidad insuficiente)

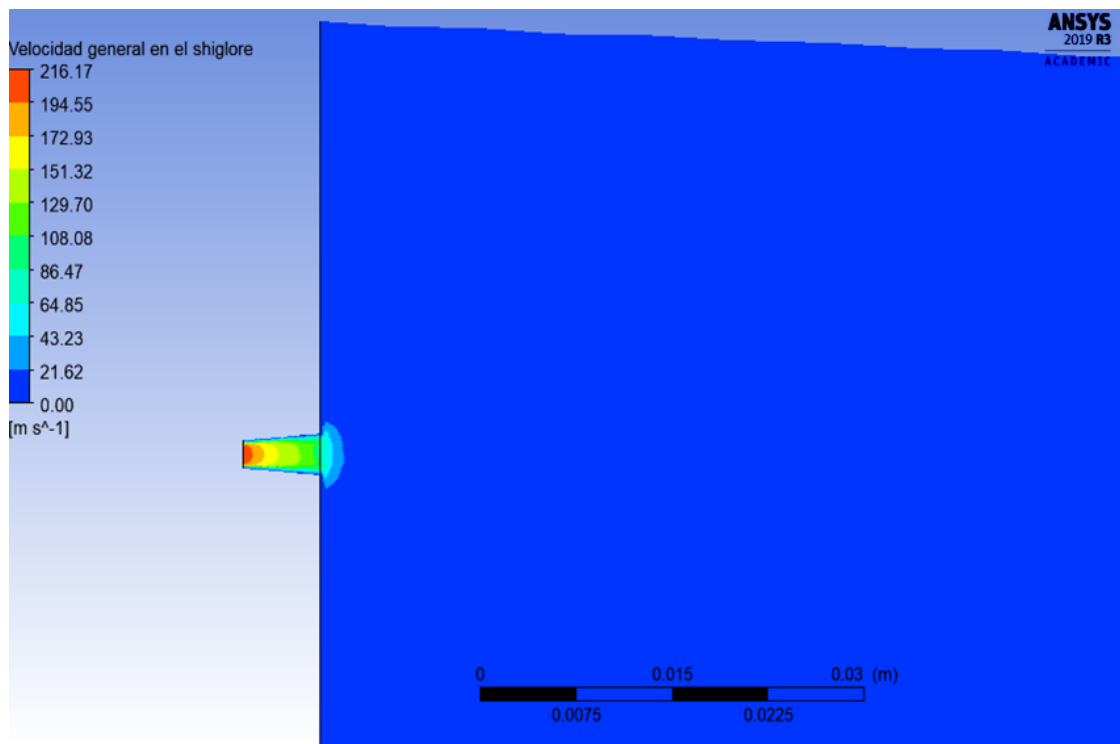




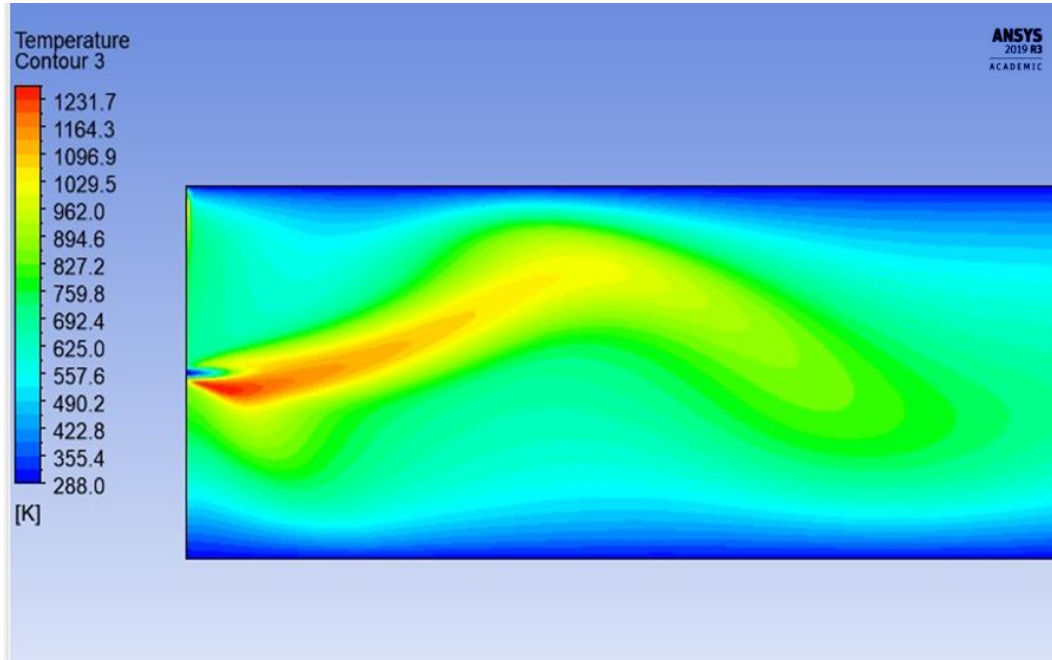
- Mezclado insuficiente (pérdida de propano por flujos distintos)



**ANEXO A-6:** Desarrollo inadecuado de la velocidad en el agujero de salida de mezcla

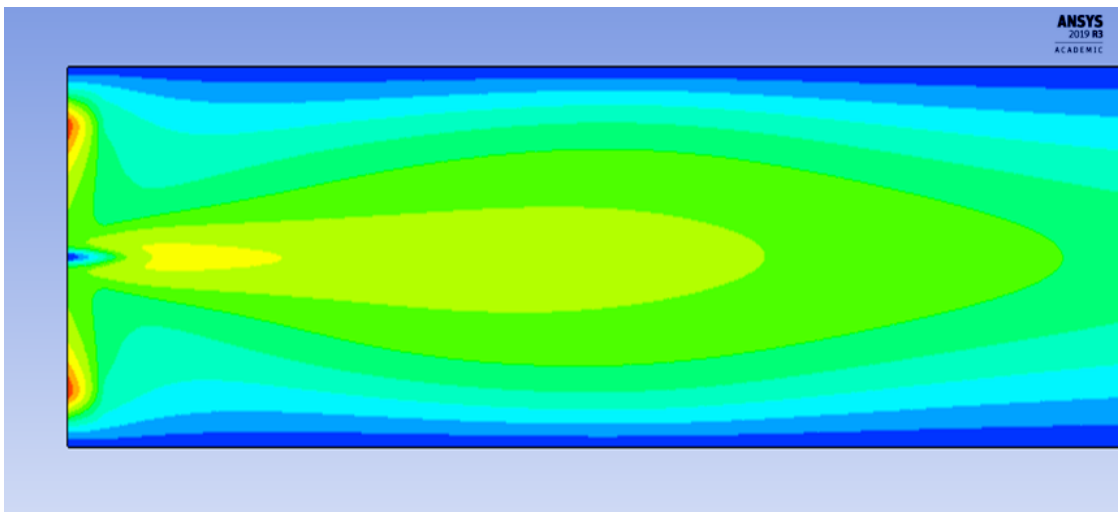


**ANEXO A-7:** Inadecuada estimación de la geometría del dominio de flama



**ANEXO A-8:** Flamas no provechosas con demasiada turbulencia o combustión inadecuada

Con velocidad exterior de 0.8 m/s



Con velocidad exterior de 1.1 m/s

