

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN
ENERGÍA



**“CARACTERIZACION DEL ATOMIZADO DE ETANOL Y
PROPANO EN INYECTORES TIPO Y MEDIANTE
SOLIDWORKS FLOW SIMULATION”**

AUTOR: Bach. ROJAS CHAVEZ SAMIR BOSET
Bach. HUARAZ RODRIGUEZ MIGUEL ANGEL

ASESOR: M.SC. ROBERTO C. CHUCUYA HUALLPACHOQUE

**TESIS PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN ENERGÍA**

Chimbote – Perú

2018



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA EN ENERGÍA**

HOJA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente Tesis ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando encuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el título profesional en la Universidad Nacional del Santa (R: D: N° 471-2002-CU-R-UNS) de acuerdo a la denominación siguiente:

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN ENERGÍA

**Título: “CARACTERIZACIÓN DEL ATOMIZADO DE ETANOL Y PROPANO EN
INYECTORES TIPO Y MEDIANTE SOLIDWORKS FLOW SIMULATION”**

TESISTAS:

Bachiller ROJAS CHÁVEZ, Samir Boset

Bachiller HUARAZ RODRÍGUEZ, Miguel Ángel

MSc. Roberto Chucuya Hualpachoque

ASESOR



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA EN ENERGÍA**

HOJA DE CONFORMIDAD DEL JURADO

El presente proyecto de investigación de Tesis titulado:

**“CARACTERIZACION DEL ATOMIZADO DE ETANOL Y PROPANO EN
INYECTORES TIPO Y MEDIANTE SOLIDWORKS FLOW SIMULATION”**

Elaborado por los tesisistas:

Bachiller ROJAS CHÁVEZ, Samir Boset

Bachiller HUARAZ RODRÍGUEZ, Miguel Ángel

Revisado y Aprobado por el siguiente jurado Evaluador

Mg. Héctor Domingo Benites Villegas
Presidente

Dr. Amancio Ramiro Rojas Flores
Secretario

M.Sc. Roberto Chucuya Huallpachoque
Integrante

DEDICATORIA
SAMIR BOSET ROJAS CHAVEZ

A Dios

Quien sin estar físicamente, en todas mis etapas de estudios, me ayudo para lograr objetivos importantes para mi vida académica y personal.

A mis Padres

Hernán y Yolanda; por apoyarme desde los inicios de mi vida, brindándome sus consejos e instrucciones de los cuales he aprendido con sus vivos ejemplos de esfuerzo, responsabilidad y disciplina, gracias a ellos soy un profesional con ética que la sociedad necesita.

A mi Hermana

Estrella; por su presencia que alegra todos mis días y me inspira a ser mejor, para darle el ejemplo.

A los docentes de la Universidad Nacional del Santa por impartirme sus conocimientos y experiencias.

DEDICATORIA
MIGUEL ANGEL HUARAZ RODRIGUEZ

A Dios

Porque darne la fortaleza, amor y derramar su infinita bendición en todo el proceso de mi formación.

A mi Madre

Rosmery porque gracias a su amor, comprensión y fortaleza lograron hacer de mí un hombre de bien.

A mi Hermano

Christian por ser mi motor y mi empuje para luchar día a día y poder ser un buen ejemplo para él.

A mi Abuelo

Alejandro por haber ocupado el rol de padre y entregarme su amor y apoyo incondicionalmente

A los docentes de la Universidad Nacional del Santa por impartirme sus conocimiento y experiencias.

RECONOCIMIENTO

A los profesores M.Sc. Roberto Chucuya Huallpachoque, M.Sc. Francisco Risco Franco y Mg. Robert Guevara Chinchayan por el apoyo desinteresado en sus enseñanzas que ayudaron a crear un interés especial por la investigación en nosotros.

RESUMEN

En la actualidad, nuestro país es consumidor principalmente de combustibles derivados del petróleo, sin embargo existen un gran potencial para elaborar combustibles alternativos, tales como el etanol, el cual proviene de la caña de azúcar, almidón de papa y del maíz. Para ello se necesita de investigaciones de carácter científico, para poder brindar un soporte ingenieril, a los futuros inyectores tipo Y que se usarán en los procesos involucrados en la combustión de estos nuevos combustibles.

La inyección de hidrocarburos es una etapa importante en la combustión, donde está involucrado el proceso de atomización, el cual consiste en desintegrar en pequeñas gotas, el combustible, por un inyector para así agregar mayor área de transferencia. El tamaño de gotas generadas por el inyector debe de ser menores a $80\ \mu\text{m}$ para que pueda asegurarse así una buena combustión y evitar los contaminantes como el CO y NOx. En esta investigación se trabajó con etanol y propano, hidrocarburos alternativos de poca emisión. Este tipo de estudio precisa de ser teórico y experimental, siendo la simulación una gran herramienta para sustituir el segundo. Por lo cual se usó el método de elementos finitos incluido en el paquete Flow Simulation del Software Solidworks, donde se esbozó un inyector tipo Y de 5kW según la metodología de Mullinger y Chigier para calcular las medidas y parámetros a los cuales se evaluó. Para el cálculo de los parámetros se consideró, que el gas de atomización (aire) se encontraba en condiciones críticas y que el número de Mach es 1. De lo aplicado en la metodología se obtuvieron las medidas que caracterizan al inyector; por lo que el inyector fue diseñado para operar con $0,0001851\ \text{kg/s}$ de combustible, con un ducto de combustible y de gas de atomización de $0,2\ \text{mm}$. Los resultados revelaron que el atomizador tiene una capacidad de suministro combustible bajo tasas de $0,15$ a $0,48\ \text{g/s}$, utilizando una presión de inyección en el rango de 150 hasta $500\ \text{kPa}$ absolutos para el etanol y para el propano un suministro de combustible bajo tasa de $0,14$ a $1,41\ \text{g/s}$, utilizando el mismo rango de presión que el etanol. Además la velocidad máxima dentro del inyector es el orden de $110\ \text{m/s}$ y el número de Mach alcanzado menor de $0,35$, lo cual demuestra que no es posible alcanzar un régimen sónico dentro del inyector. Finalmente fueron evaluados los datos obtenidos de simular los combustibles junto con el aire. La ecuación que ayudo en este proceso fue la de Wigg, la cual permitió obtener los diámetros medios máscicos de gotas de los combustibles, plasmando estos gráficos junto a variables como el GLR, flujos máscicos de combustibles y presión de inyección.

ABSTRAC

Currently, our country is mainly consumer of petroleum-derived fuels; however, there is great potential to produce alternative fuels, such as ethanol, which comes from sugar cane, potato starch and corn. For this, scientific research is needed to provide engineering support to the future type Y injectors that will be used in the processes involved in the combustion of these new fuels.

The injection of hydrocarbons is an important stage in combustion, where the atomization process is involved, which consists of disintegrating the fuel in small droplets by an injector to add a larger transfer area. The size of drops generated by the injector must be less than $80\ \mu\text{m}$ so that a good combustion can be ensured and avoid contaminants such as CO and NO_x. In this investigation, we worked with ethanol and propane, alternative hydrocarbons of little emission. This type of study needs to be theoretical and experimental, with simulation being a great tool to replace the second. Therefore, the finite element method included in the Flow Simulation package of Solidworks Software was used, where a 5kW Y-type injector was sketched according to the Mullinger and Chigier methodology to calculate the measurements and parameters to which it was evaluated. For the calculation of the parameters, it was considered that the atomization gas (air) was in critical conditions and that the Mach number is 1. From what was applied in the methodology, the measurements that characterize the injector were obtained; so the injector was designed to operate with $0.0001851\ \text{kg} / \text{s}$ of fuel, with a fuel and atomization gas duct of $0.2\ \text{mm}$. The results revealed that the atomizer has a fuel supply capacity under rates of 0.15 to $0.48\ \text{g} / \text{s}$, using an injection pressure in the range of 150 to $500\ \text{kPa}$ absolute for ethanol and for propane a supply of fuel at a rate of 0.14 to $1.41\ \text{g} / \text{s}$, using the same pressure range as ethanol. Furthermore, the maximum speed inside the injector is the order of $110\ \text{m} / \text{s}$ and the reached Mach number is less than 0.35 , which shows that it is not possible to reach a sonic regime inside the injector. Finally, the data obtained from simulating the fuels together with the air were evaluated. The equation that helped in this process was that of Wigg, which allowed obtaining the average mass diameters of fuel droplets, capturing these graphs together with variables such as the GLR, mass fuel flows and injection pressure.

ÍNDICE

Hoja de conformidad del asesor

Dedicatoria

Agradecimiento

Resumen

Abstrac

Índice

CAPITULO I INTRODUCCION	1
1.1. Realidad Problemática	2
1.2. Antecedentes	3
1.3. Formulación del Problema	6
1.4. Importancia y Justificación del estudio	6
1.5. Hipótesis de la Investigación	7
1.6. Objetivos	7
1.6.1. Objetivos Generales	7
1.6.2. Objetivos Específicos	7
CAPITULO II MARCO TEORICO	8
2.1. Atomización	9
2.2. Tipos de Atomizadores	10
2.3. Influencia de las Propiedades del Líquido en la Atomización	12
2.4. Inyectores de Mezcla Interna del Tipo Y	13
2.5. Inyectores Efervescentes	17
2.6. Dinámica de fluidos computacional	20
2.7. Componentes del método de solución numérica	21
2.8. Ecuaciones de Gobierno	24
2.9. Dimensionamiento del atomizador tipo Y	29
CAPITULO III MATERIALES Y METODO	33
3.1. Metodo de Investigacion	34
3.1.1. Enfoques de los Problemas Dinámicos de los Fluidos	34
3.1.2. Dinamica de Fluidos Computacional	35
3.1.3. Componentes del Metodo de Solucion Numerica	36
3.1.4. Enfoque de Discretizacion	39
3.1.5. Simulacion de Flujo (Flow Simulation)	41

3.2. Materiales	51
3.2.1. Aire	51
3.2.2. Etanol	55
3.2.3. Propano	60
CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUCIONES	64
4.1. Cálculos de dos Parámetro del Inyector	65
4.2 Influencia de la Presión de Estancamiento en el Flujo Másico	70
4.3. Influencia de los Parámetros Operacionales Sobre el Régimen de Operación	73
4.4 Razón Másica Gas/ Líquido (Glr)	80
4.5. Diámetro Representativo de Gotas	84
4.6. Analisis Grafico de la Velocidad y Presion	90
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
5.1. Conclusiones	101
5.2. Recomendaciones	102
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	103
ANEXOS	107

TERMINOLOGIA

Caracteres Latinos

g	Aceleración de la gravedad.
h	Diámetro de la cámara de mistura, entalpia.
L	Longitud.
m	Masa.
q	Flujo de calor.
Q	Flujo de calor.
t	Tiempo.
u	Velocidad.
ν	Viscosidad cinemática.
ΔU	Velocidad del aire.
Pr	Numero de prantel.

Caracteres Griegos

Ω	Velocidad angular.
ρ	Densidad.
θ	Angulo entre los ejes de la línea de alimentación.
τ	Tensor de tensión de corte viscoso

Suscritos

a	Aire.
i	Elemento i.
l	Combustible.
g	Gas, aire.
CM	Cámara de mistura y/o mezcla

Abreviaturas

OPPU	Aceite pirolítico de neumáticos usados.
GLR	Relación másica gas/combustible.
VO	Aceites vegetales.
FB	Flujo Borroso.
CO	Monóxido de carbono.
NOX	Óxidos de Nitrógeno.
SMD	Diámetro medio de sauter.
Dmm	Diámetro medio másico de gota.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Proceso ideal de la formación de gotas a partir de una lámina líquida (BEÉR e CHIGIER, 1983)	10
Figura 2. 2 Atomización del líquido en un inyector tipo Y (Mullinger, Chigier 1974)	14
Figura 2. 3 Ilustración esquemática del mecanismo de atomización en atomizadores tipo Y (Song y Lee 1996)	15
Figura 2.4 Esquema de un inyector tipo Y-Jet y sus principales dimensiones (Mullinger y Chigier 1974)	16
Figura 2.5. Atomizador Efervescente. (LEFEBVRE, 1989)	18
Figura 2.6. Esquemas simplificados de los diseños de las diferentes configuraciones de los atomizadores efervescentes Tipo A, B, C (JEDELSKY, jicha, et al., 2009)	19
Figura N° 2.7 Ejemplo de una cuadrícula 2D, estructurada, no ortogonal, diseñada para el cálculo de flujo en un segmento de simetría de un banco de tubos escalonados	23
Figura N 3.1 Ejemplo de una cuadrícula 2D, estructurada, no ortogonal, diseñada para el cálculo de flujo en un segmento de simetría de un banco de tubos escalonados	38
Figura N 3.2. Tipos de rejillas de volúmenes finitos: nodos centrados en VC (Izquierda) y caras de VC centrado entre nodos (Derecha)	41
Figura N 3.3 Mallado computacional de la interface solido/fluido	46
Figura N 3.4 Ventana de nuevo proyecto en Flow Simulation	48
Figura Nª 3.5 Ventana de tipo de análisis en Flow Simulation	48
Figura N 3.6 Ventana de elección de fluidos de estudio	49
Figura N 3.7 Malla computacional del inyector tipo Y	49
Figura N 3.8 Capas de las condiciones de frontera del inyector tipo Y	50
Figura N 3.9 Ventana de ejecución del Flow Simulation	50
Figura N 3.10 Composición de la atmósfera terrestre (Rapin, Jacquard y Jacquard 1997)	53
Figura N 3.11 Dependencia de la viscosidad dinámica con la temperatura	54
Figura N 3.12 Dependencia del calor específico con la temperatura	54

Figura N 3.13 Dependencia de la conductividad térmica con la temperatura	54
Figura N 3.14 Dependencia de la densidad con la temperatura	59
Figura N 3.15 Dependencia de la viscosidad dinámica con la temperatura	59
Figura N 3.16 Dependencia del calor específico con la temperatura	59
Figura N 3.17 Dependencia de la conductividad térmica con la temperatura	60
Figura N 3.18 Dependencia de la densidad con la temperatura	62
Figura N 3.19 Dependencia de la viscosidad dinámica con la temperatura	62
Figura N 3.20 Dependencia del calor específico con la temperatura	62
Figura N° 4.1 Dimensiones del inyector de 5 kW, Chumpitaz (2016)	68
Figura N° 4.2 Vista Isométrica del inyector tipo Y de 5 kW	68
Figura N° 4.3 Detalles del ingreso de fluidos en el inyector tipo Y	70
Figura N° 4.4 Dependencia de flujo másico de etanol con la presión de estancamiento del combustible	71
Figura N° 4.5 Dependencia del flujo másico de Propano con la presión de estancamiento del combustible	71
Figura N° 4.6 Dependencia de flujo másico y velocidad de inyección del aire	72
Figura N° 4.7 Dependencia del flujo de Etanol y aire con la presión de estancamiento del aire, sobre la condición $P_l = \text{cte}$ (Etanol)	74
Figura N° 4.8 Dependencia de la velocidad del aire y del número de Mach en la salida de la boquilla con la presión de estancamiento del aire, sobre condiciones de $P_l = \text{Cte}$. (Etanol)	75
Figura N° 4.9 Dependencia del flujo de Propano y aire con la presión de estancamiento del aire, sobre la condición $P_l = \text{Cte}$. (Propano)	75
Figura N° 4.10 Dependencia de la velocidad del aire y del número de Mach en la salida de la boquilla con la presión de estancamiento del aire, sobre condiciones de $P_l = \text{cte}$ (Propano).	76
Figura N° 4.11 Condiciones de frontera para $\dot{m}_l = \text{cte}$ [0,2 y 0,15 g/s] de combustibles	77
Figura N 4.12 Dependencia de flujo y de presión de estancamiento de aire, con la presión de Est. del Etanol, sobre la condición $\dot{m}_l = \text{cte}$ (Etanol)	77

Figura N° 13 Dependencia de la velocidad y del número de Mach del aire en la salida de la boquilla, con la presión de inyección de Etanol, sobre la condición $ml=cte$ (Etanol)	78
Figura N° 14 Dependencia de flujo y de presión de estancamiento de aire, con la presión de Est. del Propano, sobre la condición $ml=cte$ (Propano)	79
Figura N° 15 Dependencia de la velocidad y del número de Mach del aire en la salida de la boquilla, con la presión de inyección del propano, sobre la condición $ml=Cte.$ (Propano)	79
Figura N° 4.16 Curva <i>GLR</i> en función de la presión del aire, sobre la condición de $Pl=Cte.$ (Etanol)	80
Figura N° 4.17 Curva <i>GLR</i> en función del flujo del Etanol, sobre la condición de $Pl=Cte.$ (Etanol)	81
Figura N° 4.18 Curva <i>GLR</i> en función de la presión del combustible, sobre la condición de $ml=Cte.$ (Etanol)	82
Figura N° 4.19 Curva <i>GLR</i> en función de la presión del aire, sobre la condición $Pl.=Cte.$ (Propano)	82
Figura N° 4.20 Curva <i>GLR</i> en función del flujo del Propano, sobre la condición $Pl=Cte.$ (Propano)	83
Figura N° 4.22 Influencia de la presión del aire en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición $ml=Cte.$ (Etanol)	84
Figura N° 4.23 Influencia de la presión de Etanol en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición de $ml=Cte$	85
Figura N° 4.24 Influencia del <i>GLR</i> en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición de $ml=cte$ (Etanol)	86
Figura N° 4.25 Influencia de la presión del aire en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición $Pl=cte$ (Etanol)	86
Figura N° 4.26 Influencia del <i>GLR</i> en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición de $Pl=cte$ (Etanol)	87
Figura N° 4.27 Influencia de la presión del aire en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición $ml=cte$ (Propano)	88
Figura N° 4.28 Influencia de la presión de Propano en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición de $ml=cte$ (Propano)	88

Figura N° 4.29 Influencia del GLR en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición de $ml=cte$ (Propano)	89
Figura N° 4.30 Influencia de la presión del aire en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición $Pl=cte$ (Propano)	89
Figura N°4.31 Influencia del GLR en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición de $Pl=cte$ (Propano)	90
Figura N° 4.32 Global Mesh de la boquilla de combustible y la cámara de mistura	90
Figura N° 4.33 Vista lateral del campo de presión del etanol, a una presión de 350 kPa	91
Figura N° 4.34 Flujo másico de etanol en función de la presión de estancamiento	91
Figura N° 4.35 Vista isométrica del etanol a 200 kPa de presión de estancamiento	92
Figura N° 4.36 Comportamiento de la presión a lo largo de la longitud del inyector	93
Figura N° 4.37 Comportamiento de la presión a lo largo de la longitud del inyector	93
Figura N° 4.38 Global Mesh de la boquilla de aire y la cámara de mistura	94
Figura N° 4.39 Flujo másico y velocidad del aire en función de la presión de estancamiento.	95
Figura N° 4.40 Vista isométrica del aire a 300 kPa de presión de estancamiento	95
Figura N° 4.41 Comportamiento de la presión a lo largo de la longitud del inyector	96
Figura N° 4.42 Comportamiento de la velocidad a lo largo de la longitud del inyector	96
Figura N° 4.43 Vista isométrica del aire a 300 kPa y etanol a 280 kPa de presión de estancamiento	97
Figura N° 4.44 Comportamiento de la presión a lo largo de la longitud del inyector	98
Figura N° 4.45 Comportamiento de la velocidad a lo largo de la longitud del inyector	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1 Resumen de la descripción del mecanismo de atomización de un inyector tipo Y (Song e Lee, 1996)	16
Tabla 2. 2. Recomendaciones para el diseño de las dimensiones de un atomizador tipo Y-jet (Mullinger y Chigier 1974)	17
Tabla N 3.1. Composición de la atmósfera libre de vapor de agua, por volumen	52
Tabla N° 4.1 Valores de estancamiento	65
Tabla N° 4.2 Valores Calculados para una Potencia de 5 kW	67
Tabla N° 4.3 Valores adoptados en el dimensionamiento del inyector tipo Y de 5 kW	69

CAPITULO I
INTRODUCCION

1.1.REALIDAD PROBLEMÁTICA

Desde el siglo XIX, la humanidad hizo uso del petróleo como combustible. Sin embargo, este recurso se está volviendo escaso en nuestro planeta. Bajo la nueva visión de sostenibilidad la cual exige que cualquier proceso esté en armonía con el medio ambiente, la sociedad y la economía; necesitamos nuevas alternativas que atiendan estos tres parámetros. Actualmente hablamos de combustibles alternativos, los cuales ofrecen una alternativa muy interesante al diésel mineral en relación a las emisiones nocivas, desgaste, costo y disponibilidad (Méndez 2007).

Para que un país en vías de desarrollo como el nuestro, logre desarrollarse en temas relacionados a la industria y transporte se necesita de una confiable producción de energía, siendo los combustibles fósiles la materia principal para la obtención de esta energía. Sin embargo en todo el mundo, es conocido y aceptado el hecho de que los combustibles fósiles son una fuente de energía no renovable y, por lo tanto, se agotarán. En este contexto, cada vez más el precio de la gasolina, el diésel y los derivados del petróleo tienden a aumentar y, cada año, el consumo aumenta y las reservas disminuyen. Además del problema físico, existe el problema político: donde cada amenaza de guerra o crisis internacional, el precio del barril del petróleo se dispara (Quispe 2013).

Actualmente, la mayor parte de la energía consumida en el mundo proviene de los combustibles fósiles. Por ser limitadas las reservas de petróleo en la tierra, el aumento del precio del barril de Petróleo en agosto de 2008 superó la barrera de los 148 dólares. La necesidad de reducir las emisiones de CO₂ resultantes de la combustión de combustibles fósiles resultó en la búsqueda de nuevas tecnologías para producir nuevos tipos de combustibles y aditivos para los combustibles tradicionales (Sabourin y Hallenbeck 2009).

En este contexto, las fuentes de energía renovables asumen un papel importante en el mundo contemporáneo debido a la posibilidad de escasez de las reservas de petróleo, a la fluctuación de los precios de los combustibles fósiles y la contaminación ambiental generada por el empleo de estos combustibles. La búsqueda de nuevas fuentes de energía renovable que aseguran el desarrollo sostenible de la sociedad mundial, así como la necesidad de un sustituto energético capaz de mantener el equilibrio del modo de producción actual, llevó al desarrollo de nuevas tecnologías. Una de estas tecnologías es aquella que utiliza la biomasa, como el maíz para el caso

del etanol, para producir combustibles y materiales de fuentes renovables de carbono, los cuales se llamaron biocombustibles (Quispe 2013).

El uso de los combustibles alternativos generalmente presenta numerosos beneficios, incluyendo sostenibilidad, reducción de los gases de efecto invernadero, desarrollo regional, social y agrícola (Demirbas 2007). Además, los combustibles son biodegradables y no presentan emisiones de NO_x y de CO, siendo, de esta forma, ambientalmente benéficos (Ma y Hanna, 1999).

Aunque las reacciones de transformación directa de aceites vegetales en ésteres metílicos y glicerol se conozcan desde hace más de un siglo, las reacciones de interés, principalmente aquellas que producen ésteres metílicos de aceites vegetales, se han estudiado y optimizado para fabricar un producto de alta calidad conocido como biodiesel (Bournay et al., 2005). El biodiesel representa una expresiva evolución en el intento de la sustitución del aceite diésel por derivados biomasa y puede definirse como un combustible biodegradable derivado de fuentes renovables como aceites vegetales y grasas animales (Gonçalves et al., 2009).

Esta combinación de aceites vegetales y grasas animales con un alcohol, como metanol o etanol, para producir ésteres genera superioridad respecto al diésel de petróleo para la salud y el medio ambiente debido al bajo contenido de azufre y las emisiones perjudiciales (por ejemplo, partículas en suspensión, HC, CO, etc.), el mejor ciclo de vida de CO₂ para la reducción del calentamiento global, así como el rendimiento del motor (aumento de la lubricidad, alto número de cetano para combustión completa) ha llevado a un ritmo acelerado de desarrollo y comercialización de estos combustibles en el mundo (Quispe 2013) . Este comportamiento ha exigido a las industrias que usan hornos, quemadores y demás artículos de combustión, a cambiar sus accesorios tecnológicos para ser compatible con estas nuevas alternativas.

1.2.ANTECEDENTES

- **Chumpitaz Ayala (2016)** estudió la caracterización del OPPU atomizado y para ello se desarrolló utilizando un banco experimental para la medición del tamaño de las gotas generadas. Para ello se han diseñado y construido una banco de pruebas experimentales y dos tipos de inyectores: inyector tipo Y y efervescente.

La calidad del spray generado por la atomización del OPPU, puro y en mezclas (OPPU – Diesel), fue cuantificado mediante la medición del tamaño de gotas, utilizando un medidor láser Spraytec Malvern 2007, obteniéndose como resultado valores de D32 menores 45 μm y en el caso del inyector Y, valores experimentales cercanos a los valores teóricos calculados para el caso de los líquidos puros y mezclas. También se midieron las propiedades (masa específica, viscosidad y tensión superficial) de los líquidos puros y en mezclas, las presiones y los caudales del flujo líquido y del gas de atomización en el inyector además de las distribuciones de los tamaños de gota generados en el chorro atomizado para diferentes valores de la relación GLR.

- **Quispe et al. (2012)** presenta una metodología de cálculo para estos inyectores en el régimen subsónico donde las condiciones de operación tales como la geometría del inyector, las condiciones de presión y temperatura, las propiedades y gastos máxicos del combustible líquido y gas de atomización son conocidos. Bajo estas condiciones, un análisis de la ecuación de Wigg -que determina el diámetro medio de las gotas-, muestra que el régimen crítico solo permite obtener el menor diámetro medio de las gotas del spray. Para cualquier otra condición, el gas de atomización fluye bajo un régimen subsónico y el diámetro medio de la gota es mayor que el valor mínimo. Hemos efectuado una comparación entre las ecuaciones que definen el diámetro medio de las gotas en las diferentes variantes de la ecuación de Wigg, propuestas en diferentes trabajos, que obtienen resultados diferentes, esto es debido a una interpretación equivocada de la esencia física de la ecuación de Wigg.
- **(Jiang, Agrawal y Taylor 2016).** Este estudio demuestra la combustión de baja emisión de diesel, biodiesel y aceite vegetal recto (VO) en un combustor flexible que emplea un inyector de flujo borroso (FB) para la atomización del combustible. Mediciones de gas, temperatura y las concentraciones de CO y NOx en varios lugares axiales y radiales del combustor son adquiridos mediante el uso de termopares diseñados a medida y sondas de muestreo de gas.

La tasa de pérdida de calor a través del combustor se calcula a partir de las temperaturas de las paredes, medidas por una cámara infrarroja. Un simple

modelo de gotas es utilizado para predecir el comportamiento de vaporización de combustible en la región oscura cerca de la salida del inyector. Los resultados del inyector FB produjo las llamas azules limpias que indicaban principalmente combustión premezclada para los tres combustibles. Los perfiles coincidentes de la tasa de pérdida de calor y la temperatura del gas del producto muestran que la eficiencia de la combustión es independiente del combustible. Las emisiones de NO_x para los tres combustibles coinciden entre sí dentro de las incertidumbres de medición.

Las emisiones de CO del inyector VO son ligeramente superiores a las del diesel y del biodiesel. Esta diferencia de emisiones de CO se explica por la menor velocidad de evaporación de las gotitas rectas de inyector VO en comparación con las gotitas de biodiesel. Este estudio muestra que con inyector FB, el VO sin precalentamiento o pretratamiento químico se puede quemar de forma limpia en hornos, calderas o sistemas estacionarios de generación de energía, ofreciendo beneficios económicos y ambientales significativos.

- **Teixeira et al. (2004)** .El proceso de inyección de combustible tiene un papel importante en diversos aspectos relacionados con la eficiencia de la combustión. Para producir una elevada razón entre superficie y masa en fase líquida, resultando en elevadas tasas de vaporización, el combustible líquido necesita ser atomizado antes de ser inyectado en la zona de combustión. De hecho, la atomización es proceso donde el volumen de líquido se convierte a pequeñas gotas. En los atomizadores tipo "Y-Jet", el combustible líquido es inyectado en una cámara de mezcla junto con aire comprimido, y otro gas auxiliar. Parte de las gotas están formadas por el impacto del líquido con el flujo de aire en el interior de la cámara de mezcla, pero la mayoría de las gotas son generadas por la película líquida formada a lo largo de la pared de la cámara de mezcla a través de la deflexión del chorro líquido por la alta velocidad del flujo de aire que fluye a lo largo de la región central de la cámara. El presente trabajo muestra los principios básicos de diseño para atomizadores tipo "Y-Jet" y un ejemplo de diseño y construcción de un atomizador para aceite diesel. El artículo presenta el diámetro medio de Sauter (SMD), medido a través del esparcimiento de la luz de un haz de láser; Además de las condiciones de combustión en un horno de laboratorio, incluidas las medidas de CO y NO_x.

1.3.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

La principal problemática de esta investigación se refleja en la siguiente pregunta:
¿Cuáles son los parámetros que caracterizan la atomización del combustible etanol y propano en inyectores tipo Y mediante la utilización de software Solidworks Flow Simulation?

1.4.IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El estudio de los inyectores para combustibles alternativos como biodiesel, etanol, aceite pirolítico, etc; Es una línea de investigación muy importante en estos últimos años, ya que su progreso proporciona alternativas a los procesos industriales. Los inyectores tipo Y son muy utilizados en la generación de vapor, generación de energía eléctrica y hornos en donde cumplen la función de atomizar en pequeñas gotas el combustible líquido que se desea ingresar a la cámara de combustión. La mayoría de combustibles, actualmente utilizados, tales como Diesel, Fuel Oil, Jet Fuel, petróleo, etc, son alternativas que han causado mucho daño a nuestra a nuestro planeta. En vista de que la población es dependiente de la energía, nuevas soluciones han surgido, hidrocarburos como el metanol, hidrogeno, propanol y biodiesel son la alternativa para poder seguir generando la energía necesaria, pero sin contaminar. Para estas nuevas alternativas se necesitan cambios tecnológicos en los accesorios que forman parte de la combustión, en este trabajo nos enfocamos en la atomización en el inyector, para lo cual será necesario un estudio de los principales parámetros que influyen en este proceso.

Estos estudios necesitan un análisis teórico y experimental de las diferentes variables involucradas en el proceso de atomización. Algunos trabajos experimentales publicados en periódicos internacionales son los trabajos de Cai, Li y Tian (2016), Kegl y Hribernik (2006), Khalid et al. (2014) y (Suh, Lee, 2008). Los trabajos arriba citados comparan resultados numéricos con datos experimentales de los sistemas de inyección. Los fundamentos de la mecánica de los fluidos pueden ser aplicados para descubrir cuánto de energía es necesario para alcanzar las velocidades requeridas y presión adecuada para conseguir una atomización adecuada. El flujo en un inyector fue analizado por Volmajer y Kegl (2001), en el que se utilizó un modelo de ordenador y el software CFD program FIRE, a fin de encontrar la tasa de flujo, los

resultados numéricos se compararon con los datos experimentales obtenidos en un inyector Bosh DLLA 147 S. Para esta investigación se reemplazará la parte experimental por un enfoque de simulación por elementos finitos por el software Solidworks.

1.5.HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.

- Los parámetros geométricos del inyector, así como la Presión y Velocidad de inyección, caracterizan la atomización del combustible etanol y propano en inyectores tipo Y mediante la utilización de software Solidworks Flow Simulation.

1.6.OBJETIVOS

1.6.1. OBJETIVOS GENERALES.

Caracterizar la atomización del etanol y propano en inyectores tipo Y mediante SolidWorks Flow Simulation.

1.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- a) Diseñar el modelo de inyector tipo Y que influye en la atomización del etanol y propano en el software SolidWorks Flow Simulation.
- b) Determinar el campo de presión y velocidad de inyección que influyen en la atomización del etanol y propano en el software SolidWorks Flow Simulation.
- c) Determinar el diámetro de gota de la inyección que influye en la atomización del etanol y propano en el software SolidWorks Flow Simulation.

CAPITULO II
MARCO TEORICO

2.1. ATOMIZACIÓN

La atomización según Schaschke (2014) es "la creación de pequeñas gotas de un líquido dentro de un fluido o vacío. Las gotitas pueden variar en tamaño de acuerdo con la aplicación. Pero en general presentan un área de superficie muy elevada, permitiendo así la Reacción química rápida, secado, calor y transferencia de masa. Según Lefebvre (1989), el proceso de atomización es aquel en que un chorro, hoja o Película líquida es desintegrada por la energía cinética del propio líquido, por la exposición a una Corriente de aire o gas a alta velocidad o como resultado de la aplicación de energía mecánica A través de dispositivos rotativos o vibratorios. (Lefebvre, 1989) La atomización es particularmente útil para los combustibles en los procesos de combustión Y de secado o deshidratación de productos líquidos en secadores de pulverización utilizando un producto atomizador.

La atomización se puede realizar mediante una variedad de medios: Aerodinámicamente, mecánicamente por ultrasonido, o electrostáticamente, etc. Por ejemplo, Puede ser desintegrado: por la energía cinética del propio líquido, por la exposición a un gas de alta velocidad, por la energía mecánica aplicada externamente mediante rotación o vibración (Schaschke, 2014, Liu, 2000). (Schaschke, 2014), (Liu, 2000).

En procesos de combustión es necesario que el combustible líquido sea desintegrado en gotas pequeñas para asegurar una rápida vaporización y transferencia de calor. El principio Fundamental de la desintegración de un líquido consiste en el incremento del área superficial hasta quedar Inestable y se dividir en pequeñas gotas. El proceso por el cual el líquido se transforma en gotas Depende de la naturaleza del flujo y de la geometría del atomizador. El mecanismo básico, Consiste esencialmente en la ruptura de los hilos inestables de líquido en columnas de gotas, donde la La ruptura es dependiente de la longitud y la circunferencia de la columna de líquido (Figura 1), (Quispe, Carvalho y Costa, 2011, Beér y Chigier, 1983). (Quispe, Carvalho y Costa, 2011) (Beér y Chigier, 1983).

La atomización del combustible antes de su inyección en la zona de combustión es fundamental Para la eficiencia de la combustión y el rendimiento de un horno industrial, ya que genera un alza Razón de superficie-volumen en la fase líquida,

promoviendo la evaporación de combustible y la Combustión. (Quispe, Carvalho y Costa, 2011)

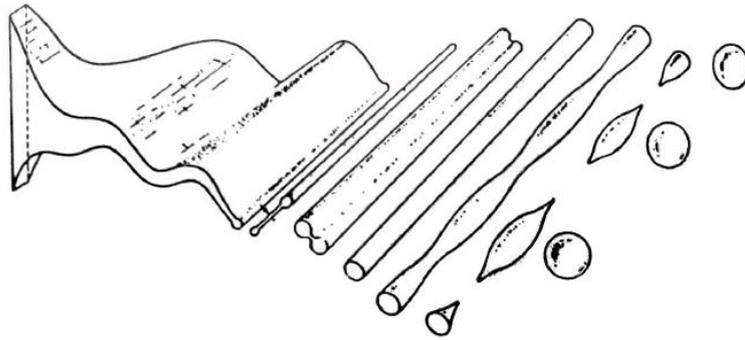


Figura 2.1. Proceso ideal de la formación de gotas a partir de una lámina líquida (Beér y Chigier, 1983).

Un Spray es una colección de gotas en movimiento, resultante del proceso de atomización, que contiene una gran variedad de tamaños de gotas. (Apaza, 2011). Las gotas, contienen cantidad de movimiento suficiente para penetrar en el medio circundante.

Los atomizadores o los inyectores son dispositivos empleados para la transformación de líquidos en las nubes de gotas, para maximizar el área de contacto del líquido con el medio Circundante. (Azevedo, 2013)

2.2. TIPOS DE ATOMIZADORES.

Para cada tipo de atomizador, el tamaño medio de la gota y la distribución del tamaño de las gotas en el spray son muy dependientes del atomizador condiciones de funcionamiento, las propiedades del líquido atomizado y del medio circundante. Los principales tipos se muestran a continuación (Chumpitaz 2016).

a) ATOMIZADORES POR PRESIÓN

Cuando un líquido es descargado bajo presión por una pequeña abertura, la entalpía del líquido se convierte en energía cinética proporcionando una velocidad relativa elevada entre el líquido y el gas circundante, acelerando y desintegrando el líquido en pequeñas gotas por efecto de la turbulencia generada. El mecanismo de atomización de estos atomizadores se basa en la capilaridad o la ruptura caótica del chorro u hoja de líquido expulsado con alta velocidad de la boquilla bajo elevada presión de la inyección. Son diseñados con pequeños orificios de salida que no son apropiados para líquidos viscosos, debido a la obstrucción que puede ocurrir. En esta categoría están: Inyector de orificio (Simple orificio), centrífugo simple (pressure-swirl simplex), inyector de centrifugado dual (Presión swirl dual), inyector centrifugado con retorno (Pressure swirl con spill return), y con Spray en abanico (Chumpitaz 2016).

b) ATOMIZADORES ROTATIVOS

El fluido se inserta en un disco o un vaso rotativo de alta rotación, que transmite una cantidad de movimiento angular para el fluido. El líquido fluye radialmente hacia la periferia del disco y se descarga al ambiente en virtud de la alta velocidad tangencial adquirida, es por eso que el grado de atomización depende de la velocidad periférica, las propiedades del líquido y el caudal.

En comparación, con los atomizadores por presión, permiten una variación independientemente del caudal y la velocidad del disco, proporcionando una mayor flexibilidad en la operación (Chumpitaz 2016).

c) ATOMIZADORES CON DOS FLUIDOS

Incluye atomizadores asistidos por aire (air assist) y por ráfaga de aire (airblast). Que utilizan la velocidad del aire para la quiebra del chorro o la hoja del líquido, primero en ligamentos, y después en gotas. La diferencia entre ellos, es la velocidad y cantidad de aire utilizado en la atomización, el inyector por ráfaga de aire (airblast) hace uso de altas cantidades de aire o vapor en comparación con los asistidos de aire (air assist). El atomizador efervescente es un caso especial de atomizador de dos

fluidos con mezcla interna, donde las burbujas de aire o gas se dispersan en la corriente de líquido. En estos inyectores el aire de atomización se inyecta directamente en el líquido en una cámara de mezcla anterior orificio de descarga. El gas inyectado forma burbujas que dan lugar a una mezcla bifásica. Al mismo tiempo pasar por el orificio de salida del inyector, la mezcla experimenta una rápida disminución en la presión, causando la expansión del gas y generando fuerzas de burbuja, por encima de la tensión superficial. A la expansión del gas causa la explosión de las burbujas y desintegra el líquido, creando un fino spray. Estos inyectores requieren una pequeña cantidad de aire para producir un spray muy fino. El mecanismo de ruptura del líquido con un inyector efervescente es fundamentalmente diferente de los inyectores por presión, asistidos por aire (air-assist) y ráfagas de aire (airblast). Comparado con un inyector airblast, los inyectores efervescentes presentan ventajas tales como como la formación de un spray con gotas más finas para una amplia gama de condiciones de la operación (Azevedo 2013).

2.3. INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DEL LÍQUIDO EN LA ATOMIZACIÓN.

Son varios los factores que afectan la calidad de la atomización, el diámetro de las gotas y la facilidad para romper los hilos y ligamentos del líquido después de salir del inyector.

A) MASA ESPECÍFICA

Al atomizar líquidos de mayor masa específica, se produce un incremento en el tamaño de las gotas y, en consecuencia, se incrementa el trabajo para obtener una buena atomización. Además, la masa específica, tiene un efecto en el caudal del líquido. Cuanto menor sea la masa específica del líquido, mayor será la velocidad en la salida del inyector y viceversa (Quispe 2013).

B) VISCOSIDAD

El incremento de la viscosidad provoca una disminución en el caudal másico, generando grandes esfuerzos cizallantes, precisando una mayor presión para mover el fluido, mantener el ángulo del cono del spray y la amplitud. El incremento de la viscosidad provoca un aumento del tamaño de las gotas, además de requerir una mayor potencia de alimentación (Quispe 2013).

C) TEMPERATURA

Aunque los cambios de temperatura no afectan el rendimiento del inyector, si afecta las propiedades del líquido, como la viscosidad, la masa específica y la tensión superficial (Quispe 2013).

D) TENSIÓN SUPERFICIAL

Un aumento en la tensión superficial del líquido incrementa el tamaño de las gotas y la presión mínima de operación, además de disminuir el ángulo de cono del spray (Quispe 2013).

2.4. INYECTORES DE MEZCLA INTERNA DEL TIPO Y

Es un atomizador eficiente de doble fluido, con mezcla interna de multi-orificio, las boquillas del tipo Y, han sido ampliamente utilizadas en calderas de aceite, hornos industriales, pulverizadores agrícolas, secados por spray (spray dryer) y sprays de pintura. El inyector tipo Y, es del tipo de inyector asistida por aire, ya que cuenta con un fluido auxiliar a alta velocidad, sobre el combustible líquido, siendo influenciado el rendimiento de la atomización por la presión en la inyección, las propiedades del líquido y el gas son configuración geométrica del inyector. (Lacava, Pimenta y Carvalho 2004), (Song y Lee, 1996).

Estos inyectores inicialmente desintegran el combustible líquido dentro de una cámara de mezcla, generando gotas y una capa fina que se adhiere a la pared de la cámara, prosiguiendo se rompe esta capa fuera del inyector. El combustible ya desintegrado en finas gotas se dispersa dentro de la cámara de combustión, donde ocurre la quema de estas gotas (Quispe, Carvalho y Costa 2011)

El proceso físico de atomización del inyector del tipo Y se muestra en la Figura 2. 2 donde combustible líquido se inyecta en la cámara de mezcla con un ángulo determinado, mientras que el fluido de atomización (aire o vapor comprimido) se introduce en la cámara central con la presión necesaria para proporcionar condiciones sónicas al chorro de salida. El combustible líquido forma una película anular alrededor de la pared de la cámara de mezcla, con el chorro atomizado a alta velocidad pasando por el centro a lo largo de la cámara de mezcla. Una cierta atomización ocurre en la cámara de mezcla, pero la mayor cantidad sale de la cámara en forma de láminas de líquido, que son desintegradas en ligamentos y luego en

gotas. La segunda atomización ocurre a continuación, fuera del atomizador por algunos 50 diámetros de la cámara de mezcla, aguas abajo (Chumpitaz 2016).

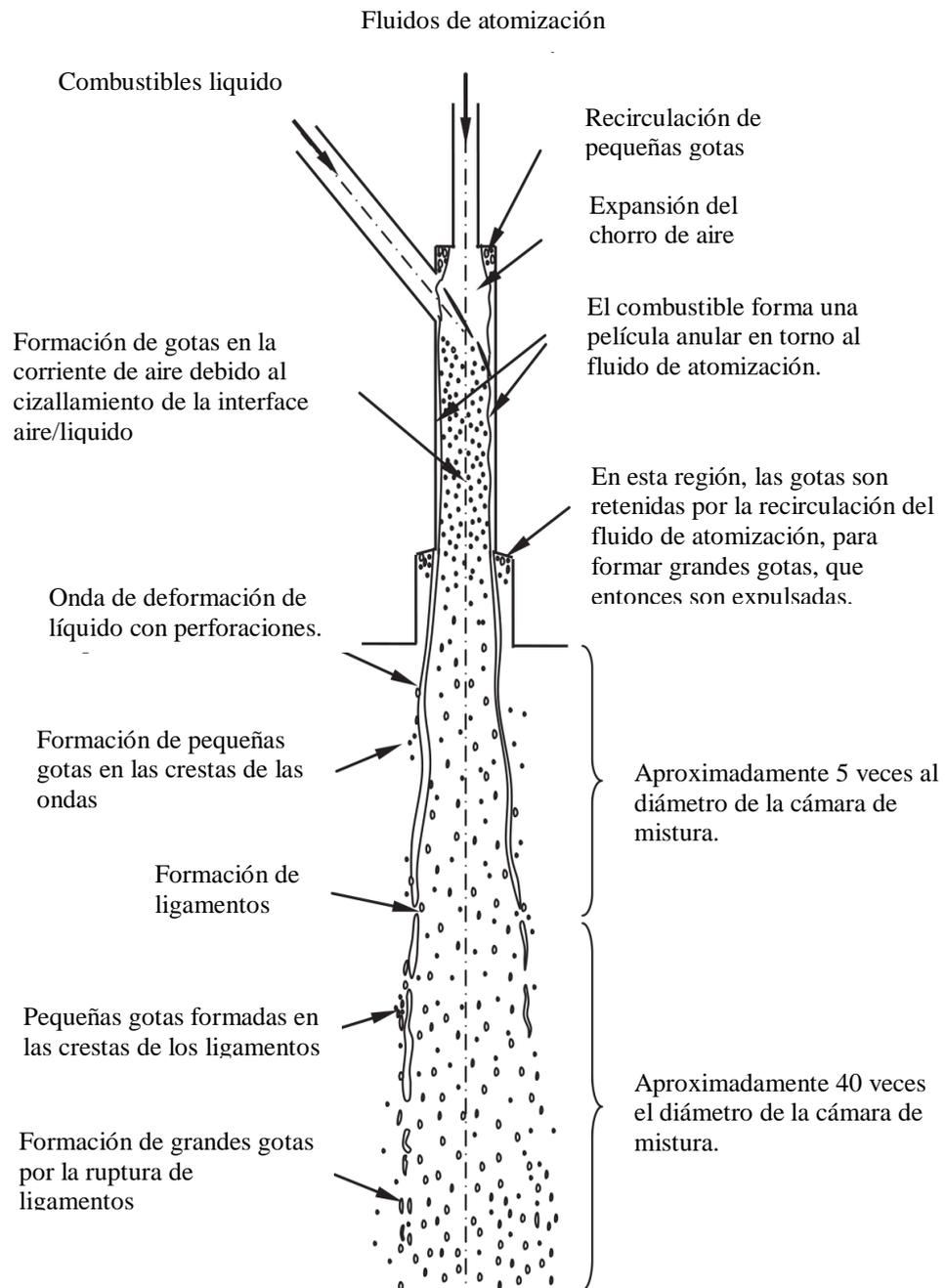


Figura 2. 2 Atomización del líquido en un inyector tipo Y (Mullinger, Chigier 1974)

El proceso se ve afectado por la relación aire / combustible, la geometría de la cámara de mezcla y velocidad del líquido atomizador (Chigier 1976).

Song y Lee (1996), hicieron la descripción del mecanismo de atomización basadas en la visualización del flujo de agua con aire. La primera se llama "modo de colisión directa", se muestra en la Figura 2.3, se caracteriza por el choque de la corriente de aire con el líquido, generando gotas cerca de la salida del líquido, la siguiente región, B es la región "modo de arrastre / deposición" que presenta una película delgada circunferencial, no uniforme, en una amplia franja, donde las gotas son generadas por el corte del chorro de aire a alta velocidad y el anillo de líquido en la pared de la cámara. Al mismo tiempo, en esta zona algunas gotas ya generadas por el modo de colisión directa se aglutinan y depositan en la película líquida. Así, la longitud de la puerta de mezcla desempeña un papel primordial en esta zona de flujo de niebla-anular, porque las posibilidades de arrastre / deposición de las gotas se incrementa con el incremento de la cámara de mezcla, una vez que el tiempo de residencia se vuelve más largo y la superficie interfacial entre el aire y la película de agua también aumenta. La atomización por el "modo de desintegración de la película líquida" (región C) también se ve afectada por la longitud de la cámara de mezcla debido al movimiento entre el aire y el chorro de agua. La Tabla 2. 1 muestra un resumen del mecanismo descrito.

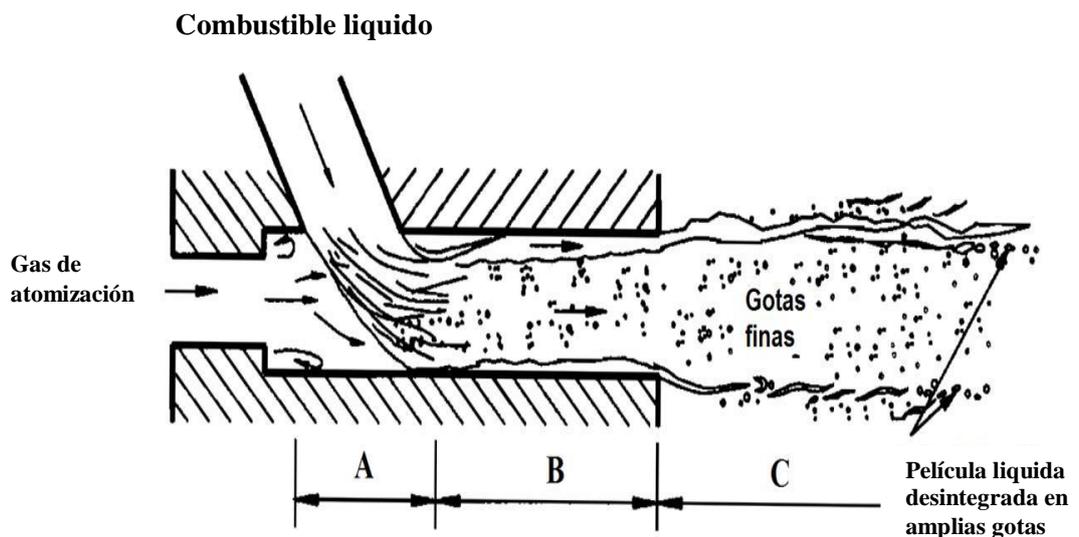


Figura 2. 3 Ilustración esquemática del mecanismo de atomización en atomizadores tipo Y (Song y Lee 1996)

Tabla 2. 1 Resumen de la descripción del mecanismo de atomización de un inyector tipo Y (Song e Lee, 1996).

Región	Modo	Fenómeno principal
A	Colisión directa	.-Gotas generadas por la colisión entre el chorro líquido y el fluido de atomización (gas).
B	Trayectoria de formación de gotas	.- Una película líquida es formada y el flujo de aire es distorsionada y direccionada en la dirección axial. .-Se generan gotas por el flujo de aire cizallante y por la entrada de aire al núcleo. .- Algunas gotas se aglutinan entre sí mismas y son depositadas en la película líquida.
C	Desintegración de la película líquida	.- La película líquida se desintegra en ligamentos y después en gotas largas fuera del atomizador.

La Figura 2.4 presenta un esquema típico de este tipo, donde el fluido auxiliar puede ser aire comprimido, o en caso de vapor en el proceso, como en calderas. También la figura, presenta las características geométricas que definen la configuración del inyector Y (Lacava, Pimenta y Carvalho 2004)

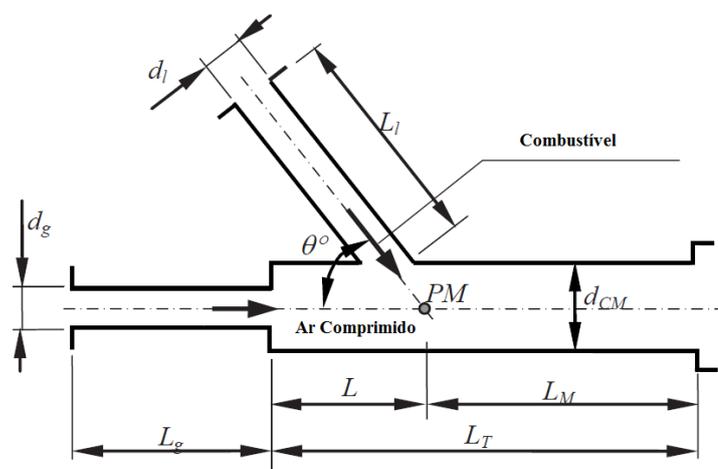


Figura 2.4 Esquema de un inyector tipo Y-Jet y sus principales dimensiones (Mullinger y Chigier 1974)

Entre los inyectores conocidos, los inyectores de tipo Y se clasifican como inyectores de chorro de aire de mezcla interna y son muy utilizados debido a:

- 1) Su configuración es relativamente simple, siendo adaptables para la construcción con materiales resistentes a la erosión y a la corrosión térmica.
- 2) El ángulo de pulverización (spray angle) no varía con el cambio del caudal de combustible o gas de atomización, lo que difiere de otros inyectores.
- 3) Una buena calidad del spray con bajo consumo del fluido auxiliar (gas de atomización). Capacidad de trabajo con combustibles altamente viscosos (Quispe 2013).

Muchas metodologías fueron propuestas y estudiadas para el proyecto de atomizador tipo Y, siendo la metodología presentada por Mullinger & Chigier (1974), y luego utilizada por Lacava, Carvalho y Mc Quay (1998), Lacava, Pimenta & Carvalho (2004) y Quispe (2013), a metodología utilizada en este trabajo. Esta metodología contiene los parámetros del proyecto recomendados, los cuales se presentan en la Tabla 2. 2.

Tabla 2. 2. Recomendaciones para el diseño de las dimensiones de un atomizador tipo Y-jet (Mullinger y Chigier 1974).

Parámetro	Recomendado
Diámetro de la línea de aire	d_g (Calculado)
Diámetro de la línea de combustible	$d_l = d_g$
Diámetro de cámara de mezcla	$d_{CM} = (1.4 - 1.8)d_g$
Longitud de pre-mezcla	$L = (1 - 2)d_g$
Longitud de mezcla	$L_M = (4 - 5)d_g$
Longitud total de la cámara	$L_T = L + L_M$
Longitud de la línea de aire	$L_g > 2d_g$
Longitud de la línea de combustible	$L_l > 2d_g$
Angulo entre los ejes de las líneas de alimentación	$\theta = 52^\circ$

2.5. INYECTORES EFERVESCENTES

La técnica de la atomización efervescente fue desarrollada a finales de 1980 por Lefebvre y los empleados, siendo descrita, la técnica formalmente como: "atomización de líquido airado" y no obtuvo el nombre de efervescente hasta 1990. El desarrollo del atomizador efervescente fue debido a las desventajas asociadas con

la atomización flash y la disolución del gas de atomización. La atomización de flash depende de la rápida evaporación de una pequeña cantidad de líquido, porque en este estado (gaseoso) el volumen ocupado es mayor ocupando un volumen mayor en la salida de la boquilla. El problema con esta técnica es la baja tasa de crecimiento de las burbujas en el líquido, y que está limitada a líquidos con alta volatilidad o tienen alto contenido de gas disuelto. Una solución para el problema descrito fue la atomización efervescente, en la atomización efervescente, el gas se introduce (aire para el caso de la combustión) directamente dentro del caudal para crear un flujo burbujeante de dos fases. El método para inyectar el aire en el interior líquido es el método de la inyección supercrítica, basado en la disolución (flashing) intermitente de gas en el líquido. Este tipo de atomizador se muestra en la Figura 4. 10 (Lefebvre, 1989; Qian y Lin, 2011; Sovani, Sojka y Lefebvre, 2001)

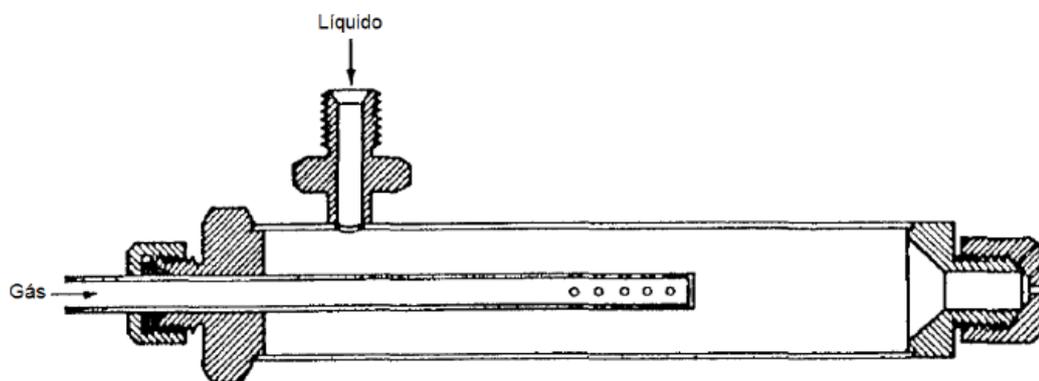


Figura 2.5. Atomizador Efervescente. (Lefebvre, 1989)

Como el líquido que fluye a través del orificio de salida, es presionado por las burbujas y gas se forman ligamentos y hojas planas de líquido. Si la caída de presión es suficientemente grande, a lo largo del orificio de descarga, aquellas hojas planas son rotas en pequeñas gotas, debido a la rápida expansión de las burbujas del gas, lo que ocurre aguas abajo del orificio de descarga. Una de las principales ventajas del atomizador efervescente, es el uso eficiente del aire, siendo posible una buena atomización con un pequeño caudal del gas atomizador, siendo usado cuando el gas de atomización es escaso (Chin y Lefebvre, 1993; Lefebvre, 1989).

a) VENTAJAS Y DESVENTAJAS:

Las ventajas del atomizador efervescente son:

- La atomización con una baja presión de inyección, y bajas tasas de flujo del gas. El tamaño del diámetro medio es comparable al obtenido para la misma tasa gas / líquido con atomizadores de tipo asistidos por aire. (Lefebvre, 1989) (Sofani, Sojka y Lefebvre, 2001) (Qian y Lin, 2011)
- El sistema contiene grandes agujeros y pasajes, lo que reduce considerablemente los problemas de obstrucción que ocurren, por ejemplo, con combustibles residuales que necesitan grandes orificios y pasajes para evitar la obstrucción, puede ser usado con soluciones viscosas, suspensiones, fluidos no newtonianos, etc. (Lefebvre, 1989; Sovani, Sojka y Lefebvre, 2001; Qian y Lin, 2011).
- Para aplicaciones de combustión, la aireación del spray por las burbujas del aire disminuye el hollín y el humo en la salida. (Lefebvre, 1989)
- La simplicidad del dispositivo permite una buena confiabilidad, resistencia, fácil el mantenimiento y el bajo costo (Lefebvre, 1989; Sovani, Sojka y Lefebvre, 2001).
- Para una determinada presión de inyección, se obtienen menores gotas en comparación otros tipos de atomizadores (Sovani, Sojka y Lefebvre, 2001).
- Las tasas de flujo de gas son menores en comparación con otras formas atomización de fluido doble (Sovani, Sojka y Lefebvre, 2001).
- El tamaño medio de la gota es insensible a la viscosidad del líquido, lo que permite el uso con varios líquidos sin modificar el rendimiento. (Sovani, Sojka y Lefebvre, 2001)

b) DESVENTAJA

- La principal desventaja y la necesidad de suministro de gas a alta presión.

Configuración del atomizador efervescente

Los atomizadores efervescentes se dividen en 3 grupos según la Figura 2.6.

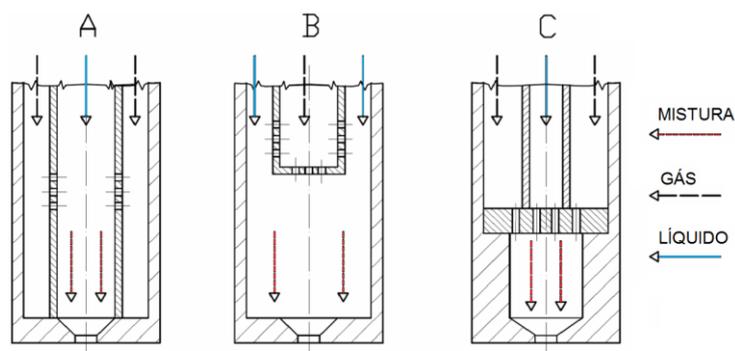


Figura 2.6. Esquemas simplificados de los diseños de las diferentes configuraciones de los atomizadores efervescentes Tipo A, B, C (Jedelsky, jicha, et al., 2009)

TIPO A: En este tipo el líquido fluye generalmente en el tubo central y el gas se introduce en el líquido por un conjunto de pequeños orificios. Esta configuración con inyección del gas de fuera para dentro permite un flujo del área líquida grande; esta configuración evita la obstrucción, lo que es adecuado para las suspensiones. Esta es la más utilizada por los investigadores, las configuraciones con los fluidos intercambiados son menos usados. Esta configuración también se conoce como de tipo fuera de dentro.

TIPO B: El líquido fluye en el conducto anular y el gas se introduce en el líquido por un conjunto de los agujeros situados en los lados o en la parte final del aireador. Esta configuración también es conocida como inyector del tipo inside-outside.

TIPO C: Los dos flujos entran en la cámara de mezcla por separado, permitiendo el control independientemente de la velocidad de entrada, dirección y distribución del líquido y el gas.

2.6. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Todos los flujos y los fenómenos relacionados pueden ser descritos por ecuaciones diferenciales parciales (o integro-diferenciales), que no pueden ser resueltas analíticamente excepto en casos especiales. Para obtener una solución aproximada numéricamente, tenemos que utilizar un método de discretización que se aproxima a las ecuaciones diferenciales por un sistema de ecuaciones algebraicas, que pueden entonces ser resuelto en una computadora. Las aproximaciones se aplican a pequeños dominios en el espacio y / o el tiempo, por lo que la solución numérica proporciona resultados discretos lugares en el espacio y el tiempo. Por mucho que la precisión de los datos experimentales sobre la calidad de las herramientas utilizadas, la precisión de las soluciones depende de la calidad de las discretizaciones utilizadas (Ferziger y Perić 2002).

Contenido en el amplio campo de la dinámica de fluidos computacional existen actividades que cubren la gama desde la automatización de ingeniería hasta métodos de diseño para el uso de soluciones detalladas de las ecuaciones Navier-Stokes como sustitutos de la investigación experimental sobre la naturaleza flujos. En un extremo, uno puede comprar paquetes de diseño, como el Solidworks Flow Simulations, para sistemas de tuberías que resuelven problemas en unos pocos segundos o minutos en ordenadores personales o estaciones de trabajo. Por otro lado, hay códigos que

pueden requerir cientos de horas en los supercomputadores más grandes (Ferziger y Perić 2002).

Si bien estos métodos se han utilizado en ingeniería de alta tecnología (por ejemplo, aeronáutica y astronáutica) desde el principio, están siendo utilizados con mayor frecuencia en los campos de ingeniería donde la geometría es complicada o alguna característica importante (como la predicción de la concentración de un contaminante) no pueden tratarse con métodos estándar. CFD está abordando procesos de, ingeniería química, civil y ambiental. El avance en estas áreas con la ayuda de esta herramienta puede producir grandes ahorros en costos de equipo, energía y en la reducción de la contaminación ambiental (Ferziger y Perić 2002).

2.7. COMPONENTES DEL MÉTODO DE SOLUCIÓN NUMÉRICA

Por lo que esta investigación trata de la simulación computacional de dos fluidos en un inyector tipo Y, hablaremos de los principales componentes del método de solución.

A) MODELO MATEMÁTICO

El punto de partida de cualquier método numérico es el modelo matemático, es decir, el conjunto de ecuaciones diferenciales parciales o integro-diferenciales y los límites condiciones. Algunos conjuntos de ecuaciones utilizadas para la predicción de flujo se presentaron en la teoría. Se elige un modelo apropiado para la aplicación de destino (incompresible, invisible, turbulento; dos o tridimensionales, etc.). Por lo ya mencionado, este modelo puede incluir simplificaciones de las leyes de conservación exactas. Un método de solución suele estar diseñado para un conjunto particular de ecuaciones (Ferziger y Perić 2002).

B) MÉTODO DE DISCRETIZACIÓN

Después de seleccionar el modelo matemático, uno tiene que elegir una discretización adecuada, es decir, un método de aproximación de las ecuaciones diferenciales por un sistema de ecuaciones algebraicas para las variables en algún conjunto de lugares en el espacio y el tiempo. Hay muchos enfoques, pero los más importantes de los cuales son: diferencia finita (FD), volumen finito (FV) y elemento finito (FE) (Ferziger y Perić 2002).

C) SISTEMAS DE COORDENADAS Y SISTEMAS VECTORIALES DE BASE

Las ecuaciones de conservación pueden ser escritas en muchas formas diferentes, dependiendo del sistema de coordenadas y la base vector utilizados. Por ejemplo, uno puede seleccionar cartesiano, cilíndrico, esférico, sistemas de coordenadas ortogonales o no ortogonales curvilíneos, que pueden ser fijo o móvil. La elección depende del flujo objetivo y puede influir el método de discretización y el tipo de rejilla a utilizar (Ferziger y Perić 2002).

Uno también tiene que seleccionar la base en la cual los vectores y tensores serán definidos (Fijo o variable, covariante o contravariante, etc.). Dependiendo de esta elección, el vector de velocidad y el tensor de tensión pueden expresarse en términos de, p. cartesiano, covariante o contravariante, física o no-física orientado a las coordenadas componentes (Ferziger y Perić 2002).

D) CUADRÍCULA NUMÉRICA

Las ubicaciones discretas en las que se van a calcular las variables se definen por la malla numérica que es esencialmente una representación discreta del dominio geométrico en el que se va a resolver el problema. Este divide el dominio de la solución en un número finito de subdominios (elementos, volúmenes de control, etc.). La opción a utilizar en este estudio fue:

- Grilla estructurada (regular) - Las grillas regulares o estructuradas constan de familias de líneas de cuadrícula con la propiedad que los miembros de una sola familia no cruzan entre sí y cruzan a cada miembro de las otras familias sólo una vez. Esta permite que las líneas de un conjunto dado se numeren consecutivamente. La posición de cualquier punto de rejilla (o volumen de control) dentro del dominio se identifica de forma única por un conjunto de dos índices (en 2D) o tres (en 3D), con (i, j, k) (Ferziger y Perić 2002).

Esta es la estructura de cuadrícula más sencilla, ya que es lógicamente equivalente a una matriz cartesiana cuadrícula. Cada punto tiene cuatro vecinos más cercanos en dos dimensiones y seis en tres dimensiones; uno de los índices de cada vecino del punto P (índices i, j, k) difiere por ± 1 del índice correspondiente de P . Un ejemplo de una rejilla 2D estructurada se muestra en la figura 2.5 Esta conectividad de punto vecino simplifica la programación y la matriz del sistema de ecuaciones algebraicas

a una estructura regular, que puede ser explotada en el desarrollo de una técnica de solución (Ferziger y Perić 2002).

De hecho, existe un gran número de solucionadores eficaces aplicables. La desventaja de las redes estructuradas es que sólo pueden utilizarse para dominios de soluciones geoméricamente simples. Otro es ventaja es que puede ser difícil controlar la distribución de la Puntos de rejilla: concentración de puntos en una región por razones de precisión produce espaciamiento innecesariamente pequeño en otras partes del dominio de la solución y un desperdicio de recursos. (Ferziger y Perić 2002).

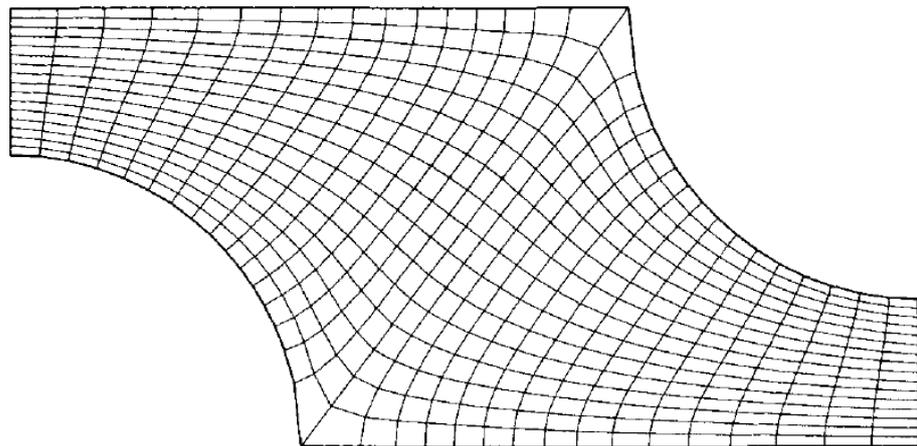


Figura N° 2.7 Ejemplo de una cuadrícula 2D, estructurada, no ortogonal, diseñada para el cálculo de flujo en un segmento de simetría de un banco de tubos escalonados.

E) APROXIMACIONES FINITAS

Siguiendo la elección del tipo de cuadrícula, uno tiene que seleccionar las aproximaciones en el proceso de discretización. En un método de diferencias finitas, las aproximaciones para las derivadas en los puntos de la rejilla tienen que ser seleccionados. En volúmenes finitos, uno tiene que seleccionar los métodos de aproximación de la superficie y volúmenes integrales. En el método de elementos finitos, uno tiene que elegir la forma de las funciones (elementos) y funciones de ponderación. Hay muchas posibilidades para elegir; la elección influye en la exactitud de la aproximación. También afecta la dificultad de desarrollar el método de solución, codificarlo, depurarlo, y la velocidad del código. Las aproximaciones más precisas implican más nodos y proporcionan matrices de coeficientes más

completos. El aumento de la necesidad de memoria puede requerir usar rejillas más gruesas, compensando parcialmente la ventaja de una mayor precisión. Un compromiso entre simplicidad, facilidad de implementación, precisión y la eficiencia computacional tiene que ser hecha (Ferziger y Perić 2002).

F) MÉTODO DE SOLUCIÓN

La discretización produce un gran sistema de ecuaciones algebraicas no lineales, el método de solución depende del problema. Para flujos inestables, los métodos basados en problemas de valor inicial para las ecuaciones diferenciales ordinarias (varia en el tiempo) son muy útiles. Los problemas de flujo constante se resuelven generalmente mediante pseudo-time o un esquema de iteración equivalente. Dado que las ecuaciones son no lineales, se utiliza un esquema de iteración para resolverlos. Estos métodos utilizan linealización sucesiva de las ecuaciones y los sistemas lineales resultantes son casi siempre resueltos por técnicas iterativas. La elección del solucionador depende del tipo de cuadrícula y el número de nodos implicados en cada ecuación algebraica (Ferziger y Perić 2002).

G) CRITERIOS DE CONVERGENCIA

Por último, es necesario establecer los criterios de convergencia para el método iterativo. Por lo general, hay dos niveles de iteraciones: iteraciones internas, dentro de las cuales se resuelven las ecuaciones lineales y las iteraciones externas, que tratan con la no linealidad y el acoplamiento de las ecuaciones. Decidir cuándo detener la función iterativa del proceso en cada nivel es importante, ya sea para la precisión y eficiencia (Ferziger y Perić 2002).

2.8. ECUACIONES DE GOBIERNO

A) ECUACIONES DE NAVIER-STOKES PARA FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO

Flow Simulation resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes, que son formulaciones de leyes de masa, impulso y conservación de energía para flujos de fluidos. Las ecuaciones se complementan por ecuaciones de estado de fluido que definen la naturaleza del fluido, y por dependencias empíricas de densidad del fluido, viscosidad y conductividad térmica en la temperatura. Los fluidos no newtonianos, se consideran introduciendo una dependencia de su viscosidad dinámica sobre el

flujo la velocidad de cizallamiento y la temperatura, los líquidos compresibles se consideran introduciendo una dependencia de su densidad a la presión. Un problema particular es finalmente especificado por la definición de su geometría, frontera y condiciones iniciales. La simulación de flujo es capaz de predecir flujos tanto laminares como turbulentos. Los flujos laminares se producen a valores bajos del número de Reynolds, que se define como el producto de escalas representativas de velocidad y longitud divididas por la viscosidad cinemática. Cuando el número de Reynolds excede un cierto valor crítico, el flujo se vuelve turbulento, es decir, los parámetros comienzan a fluctuar aleatoriamente. La mayoría de los flujos encontrados en la práctica de ingeniería son turbulentos, por lo que la simulación de flujo se desarrolló principalmente para simular y estudiar flujos turbulentos. Para predecir flujos turbulentos, se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes de Favre, donde se consideran los efectos promediados en el tiempo de la turbulencia de flujo sobre los parámetros de flujo, mientras que se tienen en cuenta los otros fenómenos dependientes del tiempo a gran escala directamente. A través de este procedimiento, los términos adicionales conocidos como los esfuerzos de Reynolds aparecen en las ecuaciones para las cuales se debe proporcionar información adicional. Para cerrar este sistema de ecuaciones, la simulación de flujo emplea ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación, el llamado modelo k-ε. La simulación de flujo emplea un sistema de ecuaciones para describir tanto el flujo laminar como el turbulento. Además, es posible la transición de un estado laminar a turbulento y / o viceversa. Los flujos en modelos con paredes móviles (sin cambiar la geometría del modelo) se calculan especificando las condiciones de contorno correspondientes. Los flujos en modelos con partes giratorias se calculan en sistemas de coordenadas unidos a los modelos de piezas giratorias, es decir, girando con ellos, de modo que las partes estacionarias de los modelos deben ser asimétricas con respecto a la rotación del eje (Solidworks 2012).

Las leyes de conservación de la masa, el momento angular y la energía en el sistema cartesiano el sistema de coordenadas que gira con velocidad angular Ω alrededor de un eje que pasa a través del origen del sistema de coordenadas se puede escribir en la forma de conservación como sigue:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad i = 1,2,3 \dots \dots \dots (2.2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \dots \dots \dots (2.3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2} \dots \dots \dots (2.4)$$

Donde u es la velocidad del fluido, ρ es la densidad del fluido, S_i es una fuerza externa distribuida en masa por unidad de masa debido a una resistencia de los medios porosos (S_i^{poroso}), una flotabilidad ($S_i^{gravedad}$), $= -\rho g_i$, (donde g_i es el componente de aceleración gravitacional a lo largo de la i -ésima dirección de coordenadas), y la rotación del sistema de coordenadas ($S_i^{rotacion}$), es decir, $S_i = S_i^{poroso} + S_i^{gravedad} + S_i^{rotacion}$, h es la entalpía térmica, Q_H es una fuente de calor o fregadero por unidad de volumen, τ_{ik} es el tensor de tensión de corte viscoso, q_i es el flujo de calor difusivo. Los subíndices se utilizan para indicar la sumatoria sobre las tres direcciones de coordenadas (Solidworks 2012).

Para los cálculos de flujo de número de Mach alto, la siguiente ecuación de energía se utiliza:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i (E + \frac{p}{\rho})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \dots \dots (2.5)$$

$$E = e + \frac{u^2}{2} \dots \dots \dots (2.6)$$

Donde e es la energía interna.

Para los fluidos newtonianos, el tensor de esfuerzo cortante viscoso se define como:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \dots \dots \dots (2.7)$$

Según el supuesto de Boussinesq, el tensor de tensión de Reynolds tiene la siguiente forma:

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \dots \dots \dots (2.8)$$

Aquí δ_{ij} es la función delta de Kronecker (es igual a la unidad cuando $i = j$, y cero en caso contrario), μ es el coeficiente de viscosidad dinámica, μ_t es la viscosidad turbulenta y k es la energía cinética turbulenta. Obsérvese que μ_t y k son cero para flujos laminares. En el marco del modelo de turbulencia k - ε , μ_t se define utilizando dos propiedades de turbulencia básicas, a saber, la energía cinética turbulenta k y la disipación turbulenta ε .

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \dots \dots \dots (2.9)$$

Aquí f_μ es un factor de viscosidad turbulenta. Se define por la expresión:

$$f_\mu = [1 - \exp(-0.025R_y)]^2 * \left(1 + \frac{20.5}{R_T}\right) \dots \dots \dots (2.10)$$

Donde:

$$R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}, R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu} \dots \dots \dots (2.11)$$

Además, y es la distancia desde la pared. Esta función nos permite tener en cuenta la transición laminar-turbulenta.

Se usan dos ecuaciones de transporte adicionales para describir la energía cinética turbulenta y disipación.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k \dots \dots \dots (2.12)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon \dots \dots \dots (2.13)$$

Donde los términos S_ε y S_k se define como:

$$S_k = \tau_{if}^R \frac{\partial u_i}{\partial X_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B \dots \dots \dots (2.14)$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{if}^R \frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \dots \dots \dots (2.15)$$

Aquí P_B representa la generación turbulenta debido a las fuerzas de flotación y se puede escribir como

$$P_B = -\frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \dots \dots \dots (2.16)$$

Donde g_i es la componente de aceleración gravitacional en la dirección x_i , la constante $\sigma_B = 0.9$, y la constante C_B es definida como: $C_B = 1$ cuando $P_B > 0$, o de lo contrario 0;

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_\mu}\right)^3 \dots \dots \dots (2.17)$$

$$f_2 = 1 - \exp(-R_T^2) \dots \dots \dots (2.18)$$

Las constantes $C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_\varepsilon, C_k$ están definidas empíricamente. En la aplicación Flow Simulation los típicos valores usados son los siguientes:

$$C_\mu = 0.09, C_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_k = 0$$

Cuando el número de Lewis $Le = 1$, el flujo de calor difusivo se define como:

$$q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right) \frac{\partial h}{\partial x_i}, i = 1,2,3 \dots \dots \dots (2.19)$$

Aquí la constante $\sigma_c = 0.9$, Pr es el número de Prandtl, y h es la entalpía térmica. Estas ecuaciones describen flujos laminares y turbulentos. Además, son posibles transiciones de un caso a otro y posterior. Los parámetros k y u_t son cero para flujos puramente laminares (Solidworks 2012).

B) ECUACIÓN DE WIGG

En la evaluación del diámetro medio másico precisa de una formula ya desarrollada por (Wigg 1964), quien analizó el mecanismo de la atomización con los chorros de aire realzando la importancia de la energía cinética del aire de atomización e indicó que la diferencia de energía entre chorro de aire en la entrante y el spray emergente es un factor dominante que afecta el diámetro medio de las gotas. En 1964, utilizando datos experimentales de otros investigadores sobre atomización de líquidos viscosos y aire en inyectores tipo Y, Wigg logró derivar una expresión adimensional

Que permite evaluar el diámetro mediano de masa de las gotas del spray (MMD), obteniendo:

$$D_{MMD} = \frac{200V^{0.5}m_F^{0.1}\left(1+\frac{m_F}{m_A}\right)^{0.5}h^{0.1}\sigma^{0.2}}{\rho_{AT}^{0.3}\Delta U} \dots\dots\dots (2.20)$$

D_{MMD} : Diámetro medio de masa de las gotas de spray (μm)

V : Viscosidad cinemática del combustible (cSt)

m_F : Flujo másico del combustible (g/s)

m_A : Flujo másico del aire (g/s)

h : Diámetro de la cámara de mistura (cm)

σ : Tensión superficial del combustible (dinas/cm)

ρ_{AT} : Densidad del aire (g/cm³)

ΔU : Velocidad del aire de atomización (m/s)

2.9. DIMENSIONAMIENTO DEL ATOMIZADOR TIPO Y

a) PARÁMETROS DEL INYECTOR

El estado de estancamiento se define como el estado en el que la velocidad de flujo es reducido a cero isotrópicamente. Alternativamente, se define como, el estado de un fluido que es acelerado de un depósito infinito, hasta obtener el flujo determinado. Para un flujo unidimensional, adiabático y reversible; de un gas perfecto, se obtienen los parámetros del flujo para el cual es aproximado el flujo bifásico en el inyector. (Zucrow y Hoffman, 1976; Baukal y Schwartz, 2001)

En el cálculo de los parámetros geométricos en el inyector, se considera un estado de estancamiento y que, para el cálculo, el flujo puede ser representado como flujo monofásico considerando aire puro.

a.1) TEMPERATURA DE ESTANCAMIENTO

La temperatura del aire, en la boquilla, es:

$$T^* = T_0 * \left(1 + \frac{K-1}{2} M^2\right) \dots\dots\dots (2.21)$$

Donde M es el número de Mach, k el coeficiente isoentropico del aire en condiciones de estancamiento.

Teniendo en cuenta un número de Mach, M = 1 (Baukal y Schwartz, 2001; Oosthuizen y Carcscallen, 2014), resulta

$$T^* = T_0 * \left(1 + \frac{K-1}{2}\right) \dots\dots\dots (2.22)$$

a.2) PRESIÓN DE ESTANCAMIENTO

Siendo un proceso adiabático reversible, se tiene la ecuación

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{K}{K-1}} \dots\dots\dots (2.23)$$

Y con la ecuación anterior (ecuación (2.23)), se obtiene:

$$\frac{P}{P_0} = \left(1 + \frac{K-1}{2} M^2\right)^{\frac{K}{K-1}} \dots\dots\dots (2.24)$$

Y para condiciones sónicas la presión del aire es:

$$P^* = P_0 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k+1}} \dots\dots\dots (2.25)$$

a.3) MASA ESPECÍFICA DE ESTANCAMIENTO

De la ecuación de gases ideales, se tiene la ecuación de gases ideales, (2.26)

$$\rho_0 = \frac{P}{RT} \dots\dots\dots (2.26)$$

Siendo R la constante universal de los gases.

A partir de la ecuación (2.24) y (2.26) se obtiene la ecuación (2.27)

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 + \frac{K-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{K-1}} \dots \dots \dots (2.27)$$

O directamente de la presión y la temperatura, la masa específica del aire es

$$\rho^* = \frac{P^*}{RT} \dots \dots \dots (2.28)$$

a.3) ÁREA DE LA BOQUILLA EN EL INYECTOR

La velocidad es definida por la ecuación (2.29)

$$\alpha = \sqrt{KRT^*} \dots \dots \dots (2.29)$$

De la ecuación de continuidad, de la ecuación (2.28) y (2.29)

$$\dot{m} = \rho Av = \frac{pAv}{RT} = pAv \times \frac{1}{\sqrt{KRT}} \times \frac{\sqrt{K}}{\sqrt{RT}} = pAM \left(\frac{k}{RT}\right)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.30)$$

Donde el valor de T está en la ecuación (2.21)

$$\dot{m} = pAM \left(\frac{k}{RT}\right)^{\frac{1}{2}} = pAM \left[\frac{k}{RT_0} \left(1 + \frac{K-1}{2} M^2\right)\right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.30)$$

Con la ecuación (2.27)

$$\dot{m} = p_0 AM \left(\frac{k}{RT_0}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(1 + \frac{K-1}{2} M^2\right)\right]^{\frac{k+1}{2(1-K)}} \dots \dots \dots (2.31)$$

Para el caso de M=1, se obtiene

$$\dot{m}^* = \frac{p_0 A^* g}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \dots \dots \dots (2.32)$$

Y a partir de esta ecuación se obtiene el área del conducto del aire, obteniéndose la ecuación

$$A_g^* = m^* \frac{\sqrt{RT_0}}{p_{0g} \sqrt{k}} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{-\frac{k+1}{2(k-1)}} \dots\dots\dots (2.33)$$

Las presiones de inyección del combustible (P_{ic}), y la velocidad de inyección (v_{ic}) se calculan con las ecuaciones (5. 18) y (5. 19) (Lacava, Carvalho y Mcquay, 1998)

$$p_{ic} = \left(\frac{\dot{m}_c}{C_d A_g^*}\right)^2 \times \frac{1}{2 \times \rho_c} \dots\dots\dots (2.34)$$

$$v_{ic} = C_d \sqrt{\frac{2 \times P_{ic}}{\rho_{comb}}} \dots\dots\dots (2.35)$$

Donde C_d , es el coeficiente de descarga varía entre 0,7 y 0,85 según Mullinger y Chigier (1975) (Lacava, Carvalho y Mcquay, 1998), (Quispe, 2013).

El diámetro medio másico de las gotas (MMD) se determina de la ecuación desarrollada por Wigg (1964) que también fue analizada y utilizada por Quispe (2013) (Lacava, Carvalho y Mcquay, 1998; Quispe, 2013). Ver ecuación N° (2.20)

CAPITULO III
MATERIALES Y METODO

3.1. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. ENFOQUES DE LOS PROBLEMAS DINÁMICOS DE LOS FLUIDOS

Las ecuaciones de la mecánica de fluidos conocidos desde hace más de un siglo - son solubles sólo para un número limitado de flujos. Las soluciones conocidas son extremadamente útiles para ayudar a entender el flujo de fluido pero rara vez se pueden utilizar directamente en el análisis o diseño de ingeniería. Los ingenieros se han visto tradicionalmente obligado a utilizar otros enfoques.

En el enfoque más común, se utilizan simplificaciones de las ecuaciones. Estos se basan generalmente en una combinación de aproximaciones y análisis dimensional; la información empírica es casi siempre necesaria.

Un acercamiento relacionado se alcanza observando que para muchos flujos no-dimensionalizados de las ecuaciones de Navier-Stokes deja el número de Reynolds como el único parámetro independiente. Si la forma del cuerpo se mantiene fija, uno puede obtener los resultados deseados de un experimento en un modelo a escala con forma adecuada. El número de Reynolds deseado se logra mediante una cuidadosa selección del fluido y los parámetros de flujo o por extrapolación en el número de Reynolds; este último puede ser peligroso. Estos enfoques son muy valiosos y son los métodos primarios de diseño práctico de la ingeniería hasta hoy.

El problema es que muchos flujos requieren varios parámetros adimensionales para su especificación y puede ser imposible establecer un experimento que simule correctamente el flujo real. Algunos ejemplos son flujos alrededor de aeronaves o buques con el fin de lograr el mismo número de Reynolds con modelos más pequeños, la velocidad del fluido tiene que ser aumentada. Para aviones, esto puede dar un alto número de Mach si se utiliza el mismo fluido (aire); se intenta encontrar un fluido que permita hacer coincidir ambos parámetros. Una alternativa - o al menos un método complementario - vino con el nacimiento de computadoras electrónicas. Aunque muchas de las ideas clave para los métodos de solución para las ecuaciones diferenciales parciales se establecieron más de un siglo atrás, eran de poca utilidad antes de que aparecieran las computadoras. La relación entre rendimiento y costo de las computadoras ha aumentado a un ritmo espectacular desde la década de 1950 y no muestra signos de desaceleración. Mientras que el primer ordenador construido en la década de 1950 realizó sólo

unos pocos cientos de operaciones por segundo, máquinas están siendo diseñadas para producir teraflops - 10^{12} operaciones por segundo. La capacidad de almacenar datos también ha aumentado dramáticamente: discos duros con capacidad de 10 gigabytes (10 "bytes o caracteres) se encuentran sólo en supercomputadoras hace una década - ahora se encuentran en personal ordenadores.

Requiere poca imaginación para ver que las computadoras podrían hacer el estudio del flujo de fluido más fácil y más eficaz. Una vez que el poder de las computadoras había sido reconocido, el interés en las técnicas numéricas aumentó dramáticamente. La solución de las ecuaciones de la mecánica de fluidos en las computadoras se ha vuelto tan importante que ahora ocupa la atención de quizás un tercio de todos los investigadores de la mecánica de fluidos y la proporción sigue aumentando. Este campo es conocido como la dinámica de fluidos computacional (CFD). En su interior hay muchas subespecialidades.

3.1.2. DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Todos los flujos y los fenómenos relacionados pueden ser descritos por ecuaciones diferenciales parciales (o integro-diferenciales), que no pueden ser resueltas analíticamente excepto en casos especiales. Para obtener una solución aproximada numéricamente, tenemos que utilizar un método de discretización que se aproxima a las ecuaciones diferenciales por un sistema de ecuaciones algebraicas, que pueden entonces ser resuelto en una computadora. Las aproximaciones se aplican a pequeños dominios en el espacio y / o el tiempo, por lo que la solución numérica proporciona resultados discretos lugares en el espacio y el tiempo. Por mucho que la precisión de los datos experimentales sobre la calidad de las herramientas utilizadas, la precisión de las soluciones depende de la calidad de las discretizaciones utilizadas.

Contenido en el amplio campo de la dinámica de fluidos computacional existen actividades que cubren la gama desde la automatización de ingeniería hasta métodos de diseño para el uso de soluciones detalladas de las ecuaciones Navier-Stokes como sustitutos de la investigación experimental sobre la naturaleza flujos. En un extremo, uno puede comprar paquetes de diseño, como el Solidworks Flow Simulations, para sistemas de tuberías que resuelven problemas en unos pocos

segundos o minutos en ordenadores personales o estaciones de trabajo. Por otro lado, hay códigos que pueden requerir cientos de horas en los supercomputadores más grandes.

Si bien estos métodos se han utilizado en ingeniería de alta tecnología (por ejemplo, aeronáutica y astronáutica) desde el principio, están siendo utilizados con mayor frecuencia en los campos de ingeniería donde la geometría es complicada o alguna característica importante (como la predicción de la concentración de un contaminante) no pueden tratarse con métodos estándar. CFD está abordando procesos de, ingeniería química, civil y ambiental. El avance en estas áreas con la ayuda de esta herramienta puede producir grandes ahorros en costos de equipo, energía y en la reducción de la contaminación ambiental.

3.1.3. COMPONENTES DEL METODO DE SOLUCION NUMERICA

Por lo que esta investigación trata de la simulación computacional de dos fluidos en un inyector tipo Y, hablaremos de los principales componentes del método de solución.

a) MODELO MATEMÁTICO

El punto de partida de cualquier método numérico es el modelo matemático, es decir, el conjunto de ecuaciones diferenciales parciales o integro-diferenciales y los límites condiciones. Algunos conjuntos de ecuaciones utilizadas para la predicción de flujo se presentaron en la teoría. Se elige un modelo apropiado para la aplicación de destino (incompresible, invisible, turbulento; dos o tridimensionales, etc.). Por lo ya mencionado, este modelo puede incluir simplificaciones de las leyes de conservación exactas. Un método de solución suele estar diseñado para un conjunto particular de ecuaciones.

b) Método de Discretización

Después de seleccionar el modelo matemático, uno tiene que elegir una discretización adecuada, es decir, un método de aproximación de las ecuaciones diferenciales por un sistema de ecuaciones algebraicas para las variables en algún conjunto de lugares en el espacio y el tiempo. Hay muchos enfoques, pero los más importantes de los cuales son: diferencia finita (FD), volumen finito (FV) y finito elemento (FE).

c) **SISTEMAS DE COORDENADAS Y SISTEMAS VECTORIALES DE BASE**

Las ecuaciones de conservación pueden ser escritas en muchas formas diferentes, dependiendo del sistema de coordenadas y la base vector utilizados. Por ejemplo uno puede seleccionar cartesiano, cilíndrico, esférico, sistemas de coordenadas ortogonales o no ortogonales curvilíneos, que pueden ser fijo o móvil. La elección depende del flujo objetivo y puede influir el método de discretización y el tipo de rejilla a utilizar.

Uno también tiene que seleccionar la base en la cual los vectores y tensores serán definidos (Fijo o variable, covariante o contravariante, etc.). Dependiendo de esta elección, el vector de velocidad y el tensor de tensión pueden expresarse en términos de, p. cartesiano, covariante o contravariante, física o no-física orientado a las coordenadas componentes.

d) **CUADRÍCULA NUMÉRICA**

Las ubicaciones discretas en las que se van a calcular las variables se definen por la malla numérica que es esencialmente una representación discreta del dominio geométrico en el que se va a resolver el problema. Este divide el dominio de la solución en un número finito de subdominios (elementos, volúmenes de control, etc.).

La opción que utilizar en este estudio fue:

- **Grilla estructurada (regular)** - Las grillas regulares o estructuradas constan de familias de líneas de cuadrícula con la propiedad que los miembros de una sola familia no cruzan entre sí y cruzan a cada miembro de las otras familias sólo una vez. Esta permite que las líneas de un conjunto dado se numeren consecutivamente. La posición de cualquier punto de rejilla (o volumen de control) dentro del dominio se identifica de forma única por un conjunto de dos índices (en 2D) o tres (en 3D), con (i, j, k) .

Esta es la estructura de cuadrícula más sencilla, ya que es lógicamente equivalente a una matriz cartesiana cuadrícula. Cada punto tiene cuatro vecinos más cercanos en dos dimensiones y seis en tres dimensiones; uno de los índices de cada vecino del punto P (índices i, j, k) difiere por ± 1 del índice correspondiente de P . Un ejemplo de una rejilla 2D estructurada se muestra

en la figura n 3.1. Esta conectividad de punto vecino simplifica la programación y la matriz del sistema de ecuaciones algebraicas a una estructura regular, que puede ser explotada en el desarrollo de una técnica de solución.

De hecho, existe un gran número de solucionadores eficaces aplicables. La desventaja de las redes estructuradas es que sólo pueden utilizarse para dominios de soluciones geoméricamente simples. Otro es ventaja es que puede ser difícil controlar la distribución de la Puntos de rejilla: concentración de puntos en una región por razones de precisión produce espaciamiento innecesariamente pequeño en otras partes del dominio de la solución y un desperdicio de recursos.

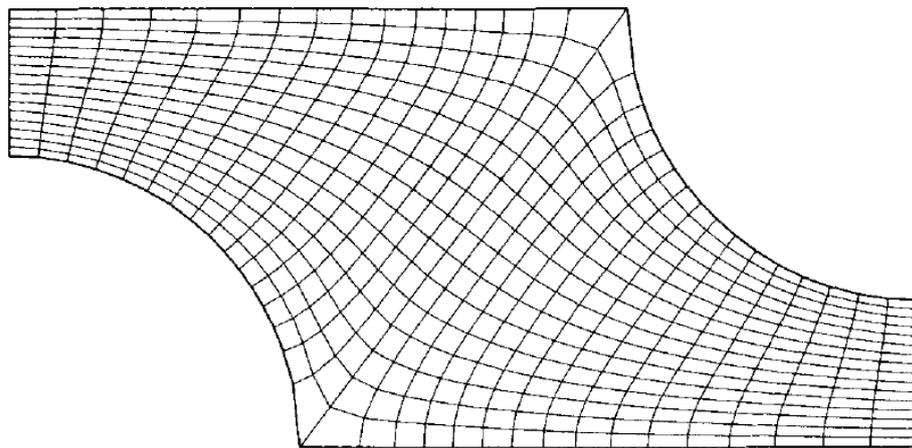


Figura N 3.1 Ejemplo de una cuadrícula 2D, estructurada, no ortogonal, diseñada para el cálculo de flujo en un segmento de simetría de un banco de tubos escalonados.

e) APROXIMACIONES FINITAS

Siguiendo la elección del tipo de cuadrícula, uno tiene que seleccionar las aproximaciones en el proceso de discretización. En un método de diferencias finitas, las aproximaciones para las derivadas en los puntos de la rejilla tienen que ser seleccionados. En volúmenes finitos, uno tiene que seleccionar los métodos de aproximación de la superficie y volúmenes integrales. En el método de elementos finitos, uno tiene que elegir la forma de las funciones (elementos) y funciones de ponderación.

Hay muchas posibilidades para elegir; la elección influye en la exactitud de la aproximación. También afecta la dificultad de desarrollar el método de solución,

codificarlo, depurarlo, y la velocidad del código. Las aproximaciones más precisas implican más nodos y proporcionan matrices de coeficientes más completos. El aumento de la necesidad de memoria puede requerir usar rejillas más gruesas, compensando parcialmente la ventaja de una mayor precisión.

Un compromiso entre simplicidad, facilidad de implementación, precisión y la eficiencia computacional tiene que ser hecha.

f) MÉTODO DE SOLUCIÓN

La discretización produce un gran sistema de ecuaciones algebraicas no lineales, el método de solución depende del problema. Para flujos inestables, los métodos basados en problemas de valor inicial para las ecuaciones diferenciales ordinarias (varía en el tiempo) son muy útiles. Los problemas de flujo constante se resuelven generalmente mediante pseudo -time o un esquema de iteración equivalente. Dado que las ecuaciones son no lineales, se utiliza un esquema de iteración para resolverlos. Estos métodos utilizan linealización sucesiva de las ecuaciones y los sistemas lineales resultantes son casi siempre resueltos por técnicas iterativas. La elección del solucionador depende del tipo de cuadrícula y el número de nodos implicados en cada ecuación algebraica.

g) CRITERIOS DE CONVERGENCIA

Por último, es necesario establecer los criterios de convergencia para el método iterativo. Por lo general, hay dos niveles de iteraciones: iteraciones internas, dentro de las cuales se resuelven las ecuaciones lineales y las iteraciones externas, que tratan con la no linealidad y el acoplamiento de las ecuaciones. Decidir cuándo detener la función iterativa del proceso en cada nivel es importante, ya sea para la precisión y eficiencia.

3.1.4. ENFOQUE DE DISCRETIZACION

a) MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS

El método VF utiliza la forma integral de las ecuaciones de conservación como su punto de partida. El dominio de la solución se subdivide en un número finito de volúmenes de control contiguos (VC), y las ecuaciones de conservación se aplican a cada VC. En el centroide de cada VC se encuentra un nodo computacional en el

cual se deben calcular los valores de las variables. La interpolación se utiliza para expresar los valores de las variables en la superficie VC en términos de los valores nodales (VC-centro). Áreas y las integrales de volumen se aproximan usando fórmulas de cuadratura adecuadas. Como resultado, se obtiene una ecuación algebraica para cada VC, en el cual un número de los valores nodales vecinos aparece.

El método VF puede acomodar cualquier tipo de rejilla, por lo que es favorable para geometrías complejas. La cuadrícula define solamente los límites del volumen de control y no necesitan estar relacionados con un sistema de coordenadas.

El enfoque VF es tal vez el más simple de entender y de programar. Todos los términos que necesitan ser aproximados tienen un significado físico y es por eso que es popular entre los ingenieros.

El método del volumen finito utiliza la forma integral de la conservación la ecuación como punto de partida:

$$\int_S \rho \phi v \cdot n dS = \int_S \Gamma \text{grad } \phi \cdot n dS + \int_{\Omega} q_{\phi} d\Omega \dots\dots\dots(3.1)$$

El dominio de la solución se subdivide en un número finito de pequeños volúmenes de control (VCs) por una rejilla que, en contraste con el método de diferencias finitas (DF) define los límites del volumen de control, no los nodos computacionales.

El enfoque habitual consiste en definir VC por una cuadrícula adecuada y asignar los nodos computacionales al centro VC. Sin embargo, también se podría realizar una rejilla, donde se definen primero las ubicaciones nodales y construyen VC a su alrededor, de modo que las caras VC se encuentran a medio camino entre los nodos; Véase la figura 3.2, nodos en los que las condiciones de contorno se aplican y se muestran como símbolos achurados.

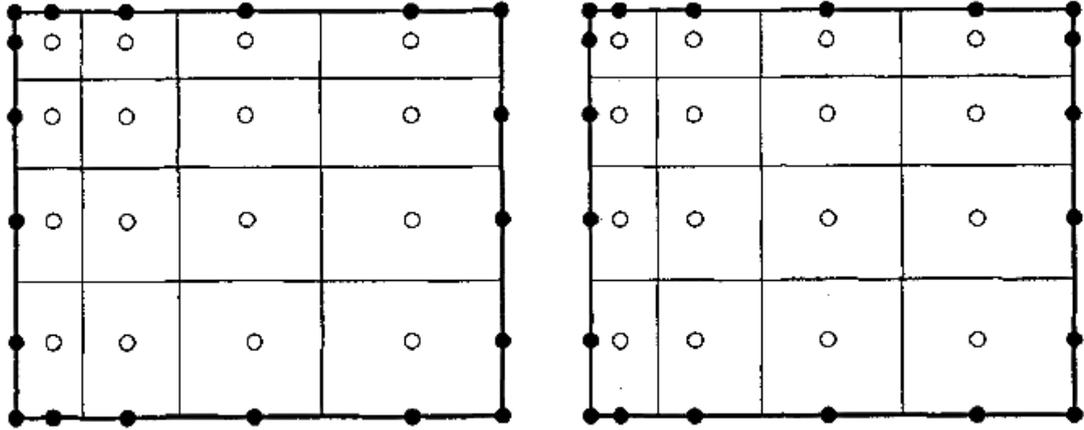


Figura N 3.2. Tipos de rejillas de volúmenes finitos: nodos centrados en VC (Izquierda) y caras de VC centrado entre nodos (Derecha).

La ventaja de la primera aproximación es que el valor nodal representa la media sobre el volumen VC a mayor precisión (segundo orden) que en el segundo enfoque, ya que el nodo está situado en el centroide del VC. La ventaja del segundo enfoque es que las aproximaciones que son derivadas en las caras VC son más precisos cuando la cara está a medio camino entre dos nodos.

La ecuación de conservación integral (3.1) se aplica a cada VC, así como el dominio de la solución en su conjunto. Si sumamos ecuaciones para todos los VC, obtenemos la ecuación de conservación global, ya que las integrales superficiales sobre las caras VC internas se cancelan. Así, la conservación global se integra en el método y esto es una de sus principales ventajas.

Para obtener una ecuación algebraica para un VC particular, la superficie, el volumen y las integrales deben ser aproximados usando fórmulas de cuadratura.

3.1.5. SIMULACION DE FLUJO (FLOW SIMULATION)

Solidwoks Flow Simulation ofrece acceso a ingenieros de producto a potentes análisis de CFD (dinámica de fluidos computacionales) capacidades que les ayuden a acelerar la innovación. Aprovechando el ambiente del conocido SOLIDWORKS 3D CAD, esta amplia tecnología no se limita a hacer que el producto funcione, se trata de entender cómo el producto se comportará en el mundo real. Esta herramienta ha sido construida para afrontar desafíos de ingeniería de CFD, SOLIDWORKS Flow Simulation permite al campo de la ingeniería aprovechar la integración del CAD, con una avanzada capacidad de

malla geométrica (mesh), potente convergencia de soluciones y determinación del régimen de flujo automático sin sacrificar la facilidad de uso o la precisión. Estudiantes y expertos en CFD, armados con SOLIDWORKS Flow Simulation, pueden predecir campos de flujo, procesos de mezcla y transferencia de calor, y directamente determinar la caída de presión, parámetros de confort, fuerzas de fluido e interacción de la estructura del fluido durante el diseño. Esta aplicación permite un CFD concurrente, sin necesidad de conocimientos avanzados de CFD. El software abarca la complejidad del análisis de flujo y permite a los ingenieros la simulación del flujo de fluido, la transferencia de calor y las fuerzas de fluido, así los ingenieros pueden investigar el impacto de un flujo de líquido o gas en el rendimiento del producto (Solidworks 2012).

Según (Solidworks 2012) dentro de los muchos campos y ventajas que trata esta útil presentamos algunos a continuación:

Evaluar y optimizar flujos complejos

- Examinar los flujos complejos a través y alrededor de sus componentes con análisis paramétrico.
- Estudia el modelo con condiciones de flujo, como presión para satisfacer los objetivos de diseño.
- Detección de turbulencias y problemas de recirculación con trayectorias de flujo
- Comprender el flujo de líquidos no newtonianos, como sangre y plástico líquido
- Evaluar el impacto de diferentes impulsores y ventiladores en su diseño
- Incluir efectos sofisticados como porosidad, cavitación, y humedad.
Reducir el riesgo de sobrecalentamiento en los diseños
- Visualizar y comprender la distribución de la temperatura en el interior y alrededor de los productos.
- Flujo de pares con análisis térmico, simulando la convección, conducción y efectos de radiación.
- Simular radiación avanzada con material semitransparente y las propiedades radiativas dependientes de la longitud de onda con el módulo HVAC.
- Aplicar condiciones de contorno dependientes del tiempo y coordenadas de fuentes de calor.

- Obtenga fuentes de calor térmico y propiedades termales.
Se obtiene información valiosa con las intuitivas herramientas de visualización de resultados.
- Utiliza diagramas de sección o de superficie para estudiar la distribución de los valores resultantes, incluyendo velocidad, presión, vorticidad, temperatura y fracción de masa.
- Comparara los resultados del flujo de fluido para varias configuraciones con el modo de comparación.
- Mide los resultados en cualquier lugar con el punto, la superficie y herramienta de parámetros de volumen.
- Grafica la variación de los resultados a lo largo de cualquier bosquejo de SOLIDWORKS.
- Lista los resultados y exporta automáticamente los datos a Microsoft Excel.

La técnica de solución numérica empleada en Flow Simulation es robusta y fiable, por lo que no requiere ningún conocimiento del usuario sobre la malla computacional y los métodos numéricos empleados. Pero a veces, si el modelo y / o el problema que se está resolviendo es demasiado complicado, de modo que la técnica de solución numérica estándar de Flujo Simulación requiere recursos informáticos extremadamente altos (memoria y / o tiempo de CPU) que no están disponibles, es conveniente emplear opciones de Flujo de Simulación que permitan el ajuste de los valores especificados automáticamente de los parámetros que rigen la Técnica de solución numérica. Para emplear estas opciones correctamente y con éxito, se tiene en cuenta la información presentada. En una malla computacional espacialmente rectangular diseñada en el sistema cartesiano de coordenadas con los planos ortogonales a sus ejes y refinados localmente en el interfaz sólido / fluido y, si es necesario, adicionalmente en regiones de fluido especificadas, en las superficies sólido / sólido y en la región de fluido durante el cálculo. Los valores de todas las variables físicas se almacenan en los centros de células de malla. Debido al método VF, las ecuaciones se discretizan en una forma conservadora. Las derivadas espaciales son aproximadas con operadores de diferencias implícitas de precisión de segundo orden. Las derivadas de tiempo son aproximadas con un esquema implícito de Euler de primer orden. La viscosidad

del esquema numérico es despreciable con respecto a la viscosidad del fluido (Solidworks 2012).

a) MALLADO COMPUTACIONAL

La malla computacional de simulación de flujo es rectangular por todas partes en el dominio computacional, por lo que los lados de las celdas de malla son ortogonales a los ejes especificados del sistema de coordenadas cartesiano y no están ajustados al interfaz sólido / fluido. Como resultado, el sólido / fluido interfaz corta las celdas de malla cerca de la pared. Sin embargo, debido a medidas especiales, los flujos de masa y calor se tratan adecuadamente en estas células denominadas parciales. El dominio de cálculo rectangular se construye automáticamente (sin embargo, se puede cambiar manualmente), por lo que encierra el cuerpo sólido y tiene los planos límite ortogonales a los ejes especificados del sistema de coordenadas cartesiano. Entonces, la malla computacional se construye en las siguientes etapas (Solidworks 2012).

En primer lugar, se construye una malla básica. Para ello, el dominio computacional se divide en cortes por los planos básicos de malla, que son evidentemente ortogonales a los ejes del sistema de coordenadas cartesiano. El usuario puede especificar el número y el espaciado de estos planos a lo largo de cada uno de los ejes. Los planos de control llamados cuya posición es especificada por el usuario pueden estar entre estos planos también. La malla básica se determina únicamente por el cálculo del dominio y no depende de las interfaces sólido / fluido (Solidworks 2012).

A continuación, las células de malla básicas que se intersectan con el interfaz sólido / fluido se dividen uniformemente en células más pequeñas con el fin de capturar el interfaz sólido / fluido con células de malla del tamaño especificado (con respecto a las celdas de malla básicas). Se emplea el siguiente procedimiento: cada una de las celdas de malla básicas que se intersectan con el interfaz sólido / fluido se divide uniformemente en 8 células infantiles; cada una de las celdas secundarias que se intersecan con la interfaz se divide a su vez en 8 células de nivel siguiente, y así sucesivamente, hasta que se alcanza el tamaño de célula especificado (Solidworks 2012).

En la siguiente etapa de engrane, la malla obtenida en la interface sólido / fluido con el procedimiento anterior es refinada (es decir, las células se dividen más o

probablemente se fusionan) de acuerdo con la curvatura de interfaz sólido / fluido. El criterio a satisfacer se establece de la siguiente manera: el ángulo máximo entre las normales a la superficie dentro de una célula no debe exceder cierto umbral, de lo contrario la célula se divide en 8 células (Solidworks 2012).

Finalmente, la malla obtenida con estos procedimientos es refinada en el dominio computacional para satisfacer el llamado criterio de canal estrecho: para cada célula situada en el interfaz sólido / fluido, el número de las celdas de malla (incluidas las celdas parciales) que se encuentran en la región de fluido a lo largo de la línea normal al interfaz sólido / fluido y partiendo desde el centro de esta célula no debe ser menor que el valor del criterio. De lo contrario, cada una de las celdas de malla de esta línea se divide en 8 celdas secundarias. Como resultado de todos estos procedimientos de mallado, se obtiene una malla computacional rectangular refinada localmente y se utiliza entonces para resolver las ecuaciones gobernantes sobre la misma. Dado que todos los procedimientos de malla antes mencionados se realizan antes del cálculo, la malla obtenida es incapaz de resolver bien todas las características de la solución. Para superar esta desventaja, la malla computacional puede ser refinada adicionalmente en los momentos especificados durante el cálculo de acuerdo con los gradientes espaciales de la solución (tanto en fluidos y en sólido). Como resultado, en las regiones de gradiente bajo las células son fusionadas, mientras que en las regiones de alto gradiente las células se dividen. Los momentos de refinamiento de la malla computacional durante el cálculo se prescriben automáticamente o manualmente.

b) APROXIMACIÓN ESPACIAL

Según (Solidworks 212) el método de volumen finito centrado en células (VF) se utiliza para obtener aproximaciones conservadoras de las ecuaciones de gobierno en la malla rectangular refinada localmente. Las ecuaciones de gobierno se integran en un volumen de control que es una celda de cuadrícula y luego se aproximan con los valores centrados en celdas de las variables básicas. Las leyes de conservación integral pueden representarse en la forma de la ecuación integral del volumen celular y de la superficie:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int U dV + \oint F dS = \int Q dV \dots\dots\dots(3.2)$$

Se sustituyen por la forma discreta:

$$\frac{\partial}{\partial t} (UV) + \sum_{\substack{\text{Superficie} \\ \text{de celdas}}} F \cdot S = Q \dots\dots\dots(3.3)$$

Las aproximaciones de segundo orden de los flujos F se basan en las aproximaciones implícitamente tratadas por la aproximación QUICK de Leonard y la variación Total diminutiva (VTD). En la simulación de flujo, las aproximaciones especialmente consistentes para los términos convectivos, los operadores div y grad se emplean para derivar un problema discreto que mantiene las propiedades fundamentales del problema diferencial, además de las propiedades habituales de conservación de la masa, el impulso y la energía (Solidworks 2012).

c) Aproximación espacial en la interface solido/fluido

Para las celdas de malla parcial (es decir, para las celdas de malla cortadas por el interfaz sólido / fluido), introducimos las caras límite adicionales y las correspondientes teniendo en cuenta las condiciones de contorno y la geometría (véase Fig. 3.3), así como un procedimiento de cálculo especial para ellos. Como resultado, la influencia de la interface sólido / fluido en la solución del problema tanto en el fluido como en el sólido se calcula muy precisamente.

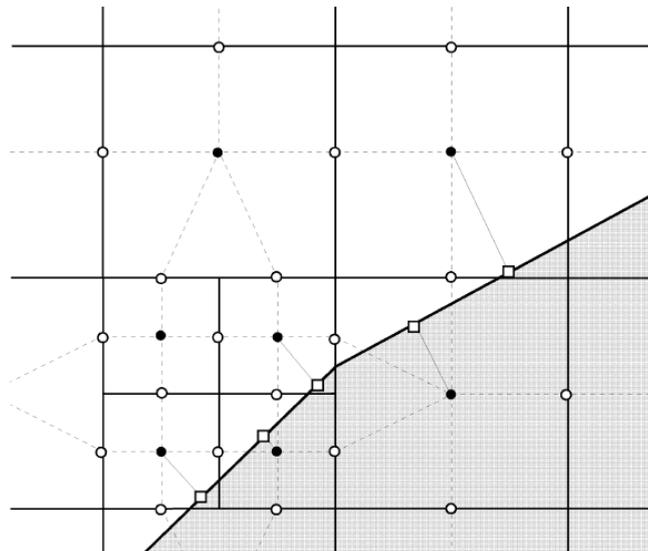


Figura N 3.3 Mallado computacional de la interface solido/fluido

d) ALGORITMO NUMÉRICO

Según (Solidworks 2012) el índice ' n ' denota el nivel de tiempo, y ' $*$ ' denota valores intermedios de los parámetros de flujo. El siguiente algoritmo numérico se emplea para calcular los parámetros de flujo en el nivel de tiempo $(n + 1)$ usando valores conocidos en el nivel de tiempo (n) :

$$\frac{U^* - U^n}{\Delta t} + A_h(U^n, p^n)U^* = S^n \dots \dots \dots (3.4)$$

$$L_h \delta p = \frac{\text{div}_h(\rho u^*)}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta t} \frac{\rho^* - \rho^n}{\Delta t}, \dots \dots \dots (3.5)$$

$$\rho^* = \rho(p^n + \delta p, T^*, y^*), \dots \dots \dots (3.6)$$

$$\rho u^{n+1} = \rho u^* - \Delta t * \mathbf{grad}_h \delta p, \dots \dots \dots (3.7)$$

$$p^{n+1} = p^n + \delta p, \dots \dots \dots (3.8)$$

$$\rho T^{n+1} = \rho T^*, \rho k^{n+1} = \rho k^*, \rho \varepsilon^{n+1} = \rho \varepsilon^*, \rho y^{n+1} = \rho y^*, \dots \dots \dots (3.9)$$

$$\rho^{n+1} = \rho(p^{n+1}, T^{n+1}, y^{n+1}) \dots \dots \dots (3.10)$$

Aquí $U = (\rho u, \rho T, \rho k, \rho \varepsilon, \rho y)^T$, es el conjunto completo de variables básicas excluyendo la presión p , $u = (u_1, u_2, u_3)^T$ es el vector velocidad, $y = (y_1, y_2, \dots, y_M)^T$ son los componentes del vector de concentración de la mistura de los fluidos, y $\delta p = p^{n+1} - p^n$ es una variable auxiliar de corrección de presión. Estos parámetros son funciones discretas almacenadas en centros celulares. Se calcularán utilizando ecuaciones discretas que se aproximan a las ecuaciones diferenciales que rigen. En las ecuaciones A_h , \mathbf{grad}_h , div_h y $L_h = \text{div}_h \mathbf{grad}_h$ son operadores discretos que se aproximan a los operadores diferenciales correspondientes con precisión de segundo orden. La ecuación (3.4) corresponde a la primera etapa del algoritmo cuando se resuelven ecuaciones de convección / difusión discreta totalmente implícitas para obtener los valores intermedios de momento y los valores finales de parámetros turbulentos, temperatura y concentraciones de especies. La ecuación de tipo elíptico (3.5) se utiliza para calcular la corrección de presión δp . Esta ecuación se define de tal manera que el campo de momento final ρu^{n+1} calculado a partir de (3.4) satisface la ecuación discreta de continuidad totalmente implícita. Valores finales de los parámetros de flujo se definen mediante las ecuaciones (3.6) - (3.10) (Solidworks 2012).

El inyector tipo Y en uso, fue esbozado en “Solidworks 2016 Edition”, según la tabla n° 4.3 de tal manera que trabajó a una potencia térmica de 5 kW. Este inyector trabajo con dos combustibles, etanol y propano, para cada uno de ellos el fluido atomizante es el mismo, el aire. Dentro del paquete Flow Simulation se debe crear un proyecto, véase en la fig. n° 3.4 realizar las especificaciones del estudio, el sistema a utilizar es el internacional (m-kg-s).

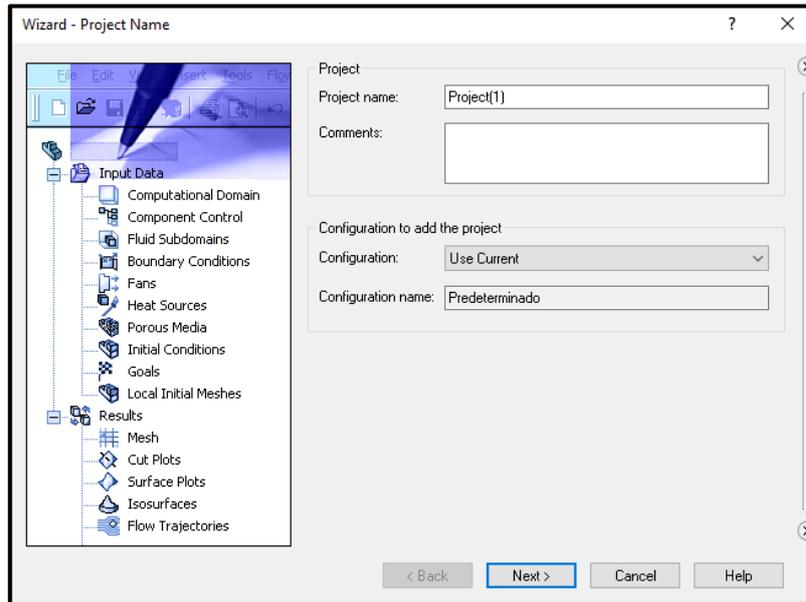


Figura N 3.4 Ventana de nuevo proyecto en Flow Simulation

El tipo de análisis será interno excluyendo las cavidades sin condiciones de flujo, esta opción solo tratará la variación de campos de velocidad, presión, etc, al interior del inyector, véase en la fig. N° 3.5.

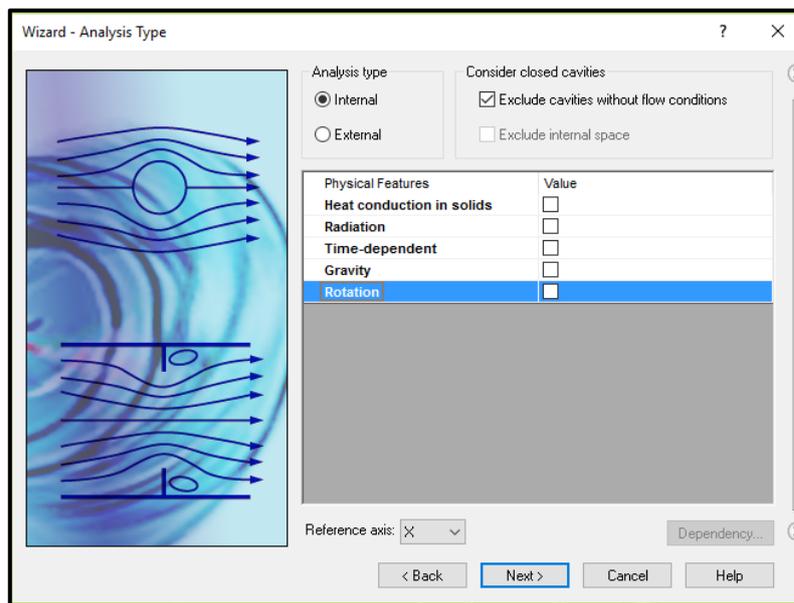


Figura Nª 3.5 Ventana de tipo de análisis en Flow Simulation

Seguidamente se debe escoger los fluidos a tratar, ya sea aire, propano y/o etanol, de acuerdo con lo que se desea hallar, véase Fig. N° 3.6.

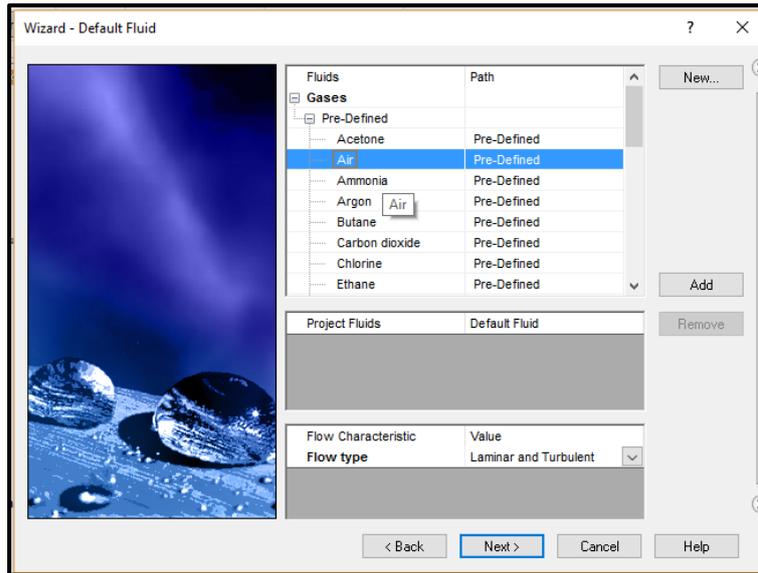


Figura N 3.6 Ventana de elección de fluidos de estudio

En la pieza esbozada se necesita especificar las medidas del mallado computacional en los tres ejes dimensionales, véase fig. N° 3.7.

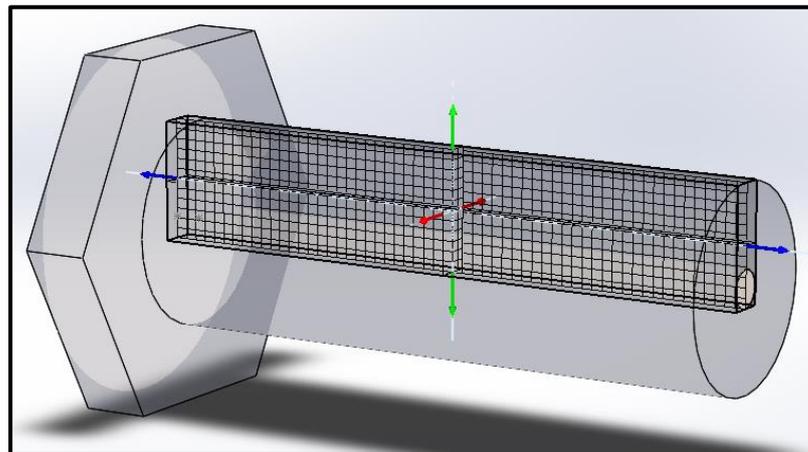


Figura N 3.7 Malla computacional del inyector tipo Y.

En el inyector existen tres lids, o capas en español los cuales son un espesor del material de accesorio que asegura la hermeticidad de él mismo. Estas capas se encuentran en tres puntos: a la salida de la cámara de mistura, entrada del combustible y en la entrada de aire, en ese orden véase en la fig. N° 3.8. Los tres permiten captar las condiciones de frontera, ya sean de presión o de flujo.

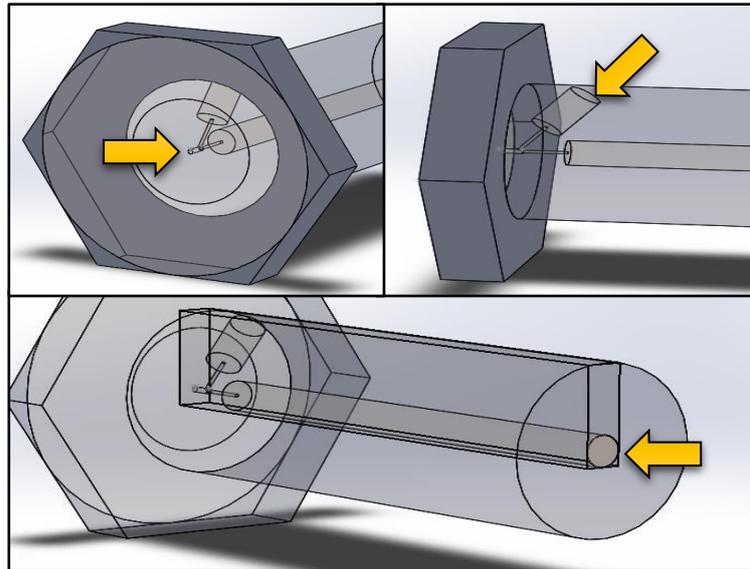


Figura N 3.8 Capas de las condiciones de frontera del inyector tipo Y

Finalmente se establece los Goals, u objetivos a medir en español los cuales pueden asumirse en la superficie de los lids, en puntos espacios en el espacio o generalmente. Después de haber ingresado todos los datos iniciales, se precede a ejecutar el programa bajo las condiciones dadas. Los objetivos perseguidos en el programa se pueden apreciar en gráficos o tablas de Excel ya sea dependiente de la iteración o del espacio, véase en la fig. N° 3.9.

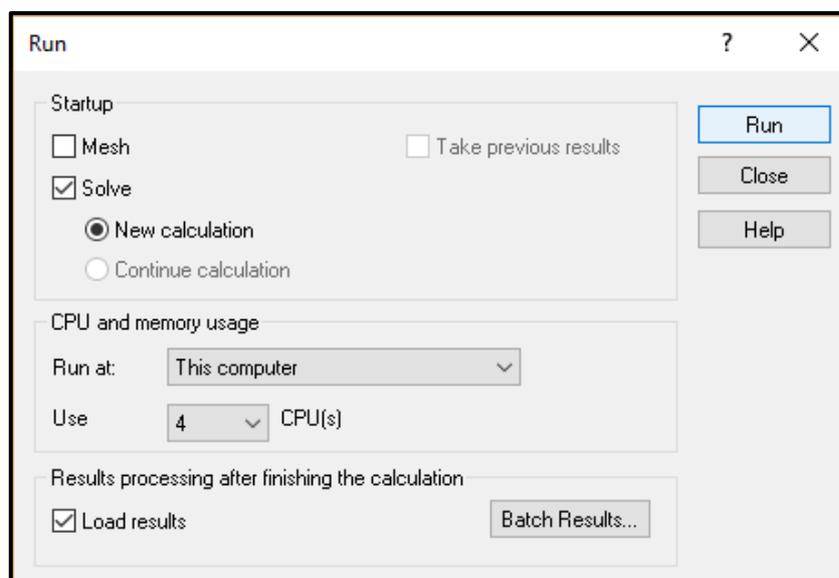


Figura N 3.9 Ventana de ejecución del Flow Simulation

3.2. MATERIALES

3.2.1. AIRE

Se denomina aire a la mezcla homogénea de gases que constituye la atmósfera terrestre, que permanecen alrededor del planeta Tierra por acción de la fuerza de gravedad. El aire es esencial para la vida en el planeta y transparente a simple vista. Es una combinación de gases en proporciones ligeramente variables, compuesto por 78,09% de nitrógeno, 20,95% de oxígeno, 0,93% de argón, 0,04% de dióxido de carbono y pequeñas cantidades de otros gases. El aire también contiene una cantidad variable de vapor de agua, en promedio alrededor de 1% al nivel del mar, y 0.4% en toda la atmósfera.

a. COMPOSICIÓN DEL AIRE

El aire está compuesto principalmente por nitrógeno, oxígeno y argón. El resto de los componentes, entre los cuales se encuentran los gases de efecto invernadero, son vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, ozono, entre otros. En pequeñas cantidades pueden existir sustancias de otro tipo: polvo, polen, esporas y ceniza volcánica. También son detectables gases vertidos a la atmósfera en calidad de contaminantes, como cloro y sus compuestos, flúor, mercurio y compuestos de azufre. (Llopis et. al 1998).

Tabla N 3.1. Composición de la atmósfera libre de vapor de agua, por volumen

Porcentaje por volumen	
Gas	Volumen (%)
Nitrógeno (N₂)	78,084
Oxígeno (O₂)	20,946
Argón (Ar)	0,9340
Dióxido de carbono (CO₂)	0,035
Neón (Ne)	0,001818
Helio (He)	0,000524
Metano (CH₄)	0,000179
Kriptón (Kr)	0,000114
Hidrógeno (H₂)	0,000055
Óxido nitroso (N₂O)	0,00003
Monóxido de carbono (CO)	0,00001
Xenón (Xe)	0,000009
Ozono (O₃)	0 a 7×10^{-6}
Dióxido de nitrógeno (NO₂)	0,000002
Yodo (I₂)	0,000001
Amoníaco (NH₃)	0,0003
No incluido en aire seco:	

Fuente: (Llopis et. al 1998)

b. PROPIEDADES DEL AIRE

Según la altitud, la temperatura y la composición del aire, la atmósfera terrestre se divide en cuatro capas: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. A mayor altitud disminuyen la presión y el peso del aire. Las porciones más importantes para el análisis de la contaminación atmosférica son las dos capas cercanas a la Tierra: la troposfera y la estratosfera. El aire de la troposfera interviene en la respiración. Por volumen está compuesto, aproximadamente, por 78,08 % de nitrógeno (N₂), 20,94 % de oxígeno (O₂), 0,035 % de dióxido de carbono (CO₂) y 0,93 % de gases inertes, como argón y neón. En esta capa, de 7 km de altura en

los polos y 16 km en los trópicos, se encuentran las nubes y casi todo el vapor de agua. En ella se generan todos los fenómenos atmosféricos que originan el clima. Más arriba, aproximadamente a 25 kilómetros de altura, en la estratosfera, se encuentra la capa de ozono, que protege a la Tierra de los rayos ultravioleta (UV). En relación con esto vale la pena recordar que, en términos generales, un contaminante es una sustancia que está «fuera de lugar», y que un buen ejemplo de ello puede ser el caso del ozono (O₃). Cuando este gas se encuentra en el aire que se respira, -es decir bajo los 25 kilómetros de altura habituales-, es contaminante y constituye un poderoso antiséptico que ejerce un efecto dañino para la salud, por lo cual en esas circunstancias se le conoce como ozono troposférico u ozono malo. Sin embargo, el mismo gas, cuando está en la estratosfera, forma la capa que protege de los rayos ultravioleta del Sol a todos los seres vivos (vida) de la Tierra, por lo cual se le identifica como ozono bueno. (Rapin, Jacquard y Jacquard 1997).

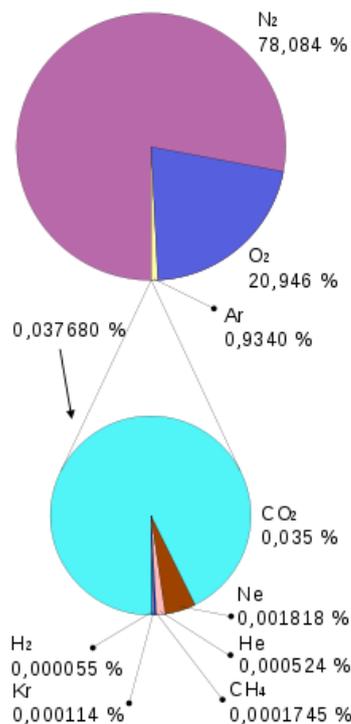


Figura N 3.10 Composición de la atmósfera terrestre (Rapin, Jacquard y Jacquard 1997)

Dentro del paquete Flow Simulation se encuentra el aire, con propiedades predeterminadas por el programa, los datos obtenidos en Engineering Database son mostrados en las siguientes figuras.

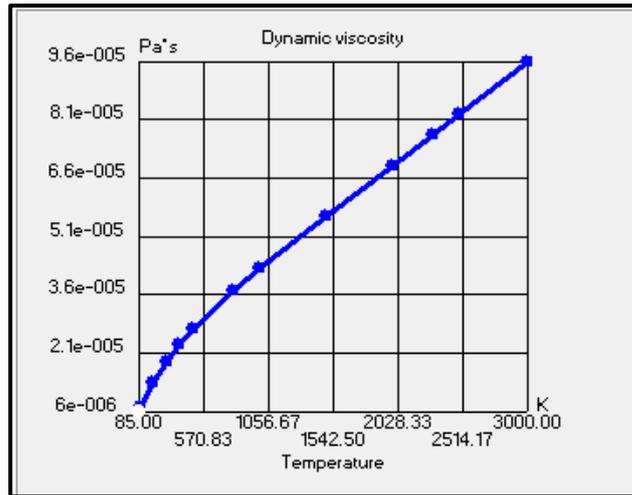


Figura N 3.11 Dependencia de la viscosidad dinámica con la temperatura

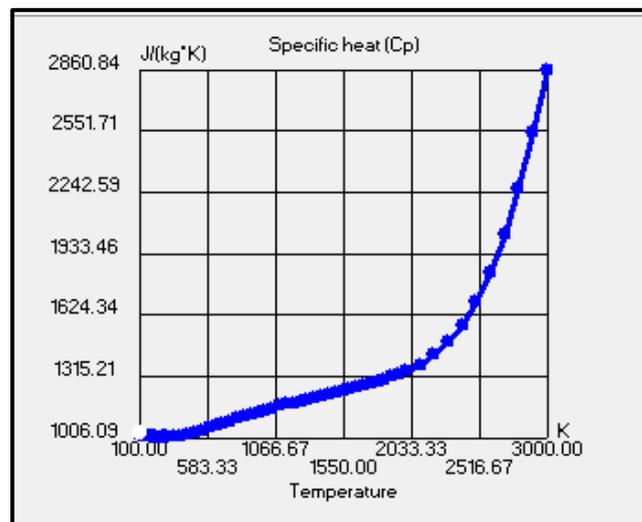


Figura N 3.12 Dependencia del calor específico con la temperatura

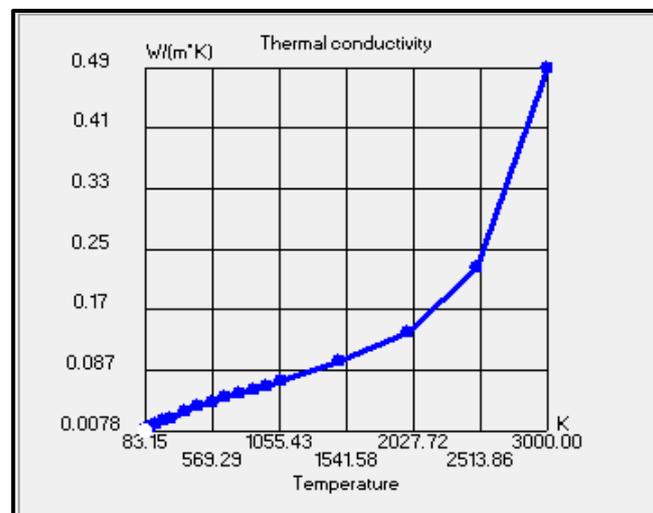


Figura N 3.13 Dependencia de la conductividad térmica con la temperatura

3.2.2. ETANOL

El etanol es un compuesto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que puede utilizarse como combustible, solo, o bien mezclado en cantidades variadas con gasolina, y su uso se ha extendido principalmente para reemplazar el consumo de derivados del petróleo. El combustible resultante de la mezcla de etanol y gasolina se conoce como gasohol oalconafta. Dos mezclas comunes son E10 y E85, con contenidos de etanol del 10% y 85%, respectivamente. El etanol también se utiliza cada vez más como añadido para oxigenar la gasolina normal, reemplazando al éter metil tert-butílico (MTBE). Este último es responsable de una considerable contaminación del suelo y del agua subterránea. También puede utilizarse como combustible en las celdas de combustible. Como fuente para la producción de etanol en el mundo se utiliza fundamentalmente biomasa. Este etanol es denominado, por su origen, bioetanol. El etanol (Alcohol Etilico) puede producirse de dos formas. La mayor parte de la producción mundial se obtiene del procesamiento de materia de origen renovable (caña de azúcar y /o derivados como melaza; sorgo dulce; sorgo rojo; remolacha; etc); en particular, ciertas plantas con azúcares. El etanol así producido se conoce como bio-etanol. Por otra parte, también puede obtenerse etanol mediante la modificación química del etileno, por hidratación (Monbiot 2008).

c. BIOETANOL

El etanol es un combustible que puede producirse a partir de un gran número de plantas, con una variación, según el producto agrícola, del rendimiento entre el combustible consumido y el generado en dicho proceso. Este etanol, conocido como bioetanol, está sujeto a una fuerte polémica: para unos se perfila como un recurso energético potencialmente sostenible que puede ofrecer ventajas medioambientales y económicas a largo plazo en contraposición a los combustibles fósiles, mientras que para otros es el responsable de grandes deforestaciones y del aumento del precio de los alimentos, al suplantar selvas y terrenos agrícolas para su producción, dudando además de su rentabilidad energética. El bioetanol tiene las mismas características y composición química que el etanol ya que se trata del mismo compuesto. La diferencia radica en su proceso de producción. El bioetanol ha de ser obtenido desde biomasa, no pudiendo obtenerse del petróleo. Todos los licores alcohólicos que proceden de la fermentación del azúcar de alguna planta se pueden

denominar como bioetanol. Debido al aumento de las medidas tomadas para controlar las emisiones totales de gases con efecto invernadero, la utilización de este alcohol como combustible para el transporte por carretera está creciendo muy rápido. Un análisis del ciclo de vida completo de este producto como combustible muestra como las emisiones generadas en el proceso de producción del combustible y las de operación son compensadas por las fijadas en el cultivo durante su crecimiento. Aún están pendientes estudios claros acerca de las emisiones de este combustible en la operación. Es posible que contaminantes orgánicos como el benceno o algunos aldehídos aumenten, por lo que es necesario estudiar su impacto en la salud humana. El etanol se obtiene fácilmente del azúcar o del almidón en cosechas de maíz y caña de azúcar, entre otros. Sin embargo, los actuales métodos de producción de bio-etanol utilizan una cantidad significativa de energía en comparación con la energía obtenida del combustible producido. Por esta razón, no es posible sustituir enteramente el consumo actual de combustibles fósiles por bio-etanol (Giampietro y Mayumi 2009).

d. FERMENTACIÓN

(Giampietro y Mayumi 2009) menciona que desde la antigüedad se obtiene el etanol por fermentación anaeróbica de azúcares con levadura en solución acuosa y posterior a una breve destilación. La aplicación principal tradicional ha sido la producción de bebidas alcohólicas

Hoy en día se utilizan varios tipos de materias primas para la producción a gran escala de etanol de origen biológico (bioetanol):

Sustancias con alto contenido de sacarosa

- Dulces
- Caña de azúcar
- Remolacha
- Melazas
- Sorgo dulce
- Sustancias con alto contenido de almidón
- Maíz
- Patata
- Yuca
- Sustancias con alto contenido de celulosa

- Madera
- Desechos de animal
- Residuos agrícolas (incluyendo los residuos de los cítricos)

El proceso a partir de almidón es más complejo que a partir de sacarosa, pues el almidón debe ser hidrolizado previamente para convertirlo en azúcares. Para ello se mezcla el vegetal triturado con agua y con una enzima (o en su lugar con ácido), y se calienta la papilla obtenida. Posteriormente se cuele la masa, en un proceso llamado escarificación, y se envía a los reactores de fermentación. A partir de celulosa es aún más complejo, ya que primero hay que pretratar la materia vegetal para que la celulosa pueda ser luego atacada por las enzimas hidrolizantes. El pretratamiento puede consistir en una combinación de trituración, pirólisis y ataque con ácidos y otras sustancias. Esto es uno de los factores que explican por qué los rendimientos en etanol son altos para la caña de azúcar, mediocres para el maíz y bajos para la madera. La fermentación de los azúcares es llevada a cabo por microorganismos (levaduras o bacterias) y produce etanol, así como grandes cantidades de CO₂. Además, produce otros compuestos oxigenados indeseables como el metanol, alcoholes superiores, ácidos y aldehídos. Típicamente la fermentación requiere unas 48 horas. La fermentación de los azúcares es llevada a cabo por microorganismos (levaduras o bacterias) y produce etanol, así como grandes cantidades de CO₂. Además, produce otros compuestos oxigenados indeseables como el metanol, alcoholes superiores, ácidos y aldehídos. Típicamente la fermentación requiere unas 48 horas. La fermentación de los azúcares es llevada a cabo por microorganismos (levaduras o bacterias) y produce etanol, así como grandes cantidades de CO₂. Además, produce otros compuestos oxigenados indeseables como el metanol, alcoholes superiores, ácidos y aldehídos. Típicamente la fermentación requiere unas 48 horas. Se pueden obtener cantidades más reducidas de alcohol combustible de los tallos, de elementos reciclados, de la paja, de las mazorcas de maíz, y de productos sobrantes de las granjas que ahora se utilizan para hacer piensos, fertilizantes, o que se utilizan como combustibles de plantas de energía eléctrica. De hecho, EEUU podría conseguir todo el etanol que necesita usando una mezcla de, por ejemplo, los tallos (parte no aprovechada) del maíz y de la planta de maíz, sin roturar más tierras de labrantío (sin embargo, habría que cultivar más tierra para substituir ese material, usado por muchos granjeros como fuente barata, confiable y limpia de piensos o fertilizantes).

e. PURIFICACIÓN

El método más antiguo para separar el etanol del agua es la destilación simple, pero la pureza está limitada a un 95-96% debido a la formación de un azeótropo de agua-etanol de bajo punto de ebullición. En el transcurso de la destilación hay que desechar la primera fracción que contiene principalmente metanol, formado en reacciones secundarias, este es el único método admitido para obtener etanol para el consumo humano.

Para poder utilizar el etanol como combustible mezclándolo con gasolina, hay que eliminar el agua hasta alcanzar una pureza del 99,5 al 99,9%. El valor exacto depende de la temperatura, que determina cuándo ocurre la separación entre las fases agua e hidrocarburos.

Para obtener etanol libre de agua se aplica la destilación azeotrópica en una mezcla con benceno o ciclohexano. De estas mezclas se destila a temperaturas más bajas el azeótropo, formado por el disolvente auxiliar con el agua, mientras que el etanol se queda retenido. Otro método de purificación muy utilizado actualmente es la adsorción física mediante tamices moleculares.

A escala de laboratorio, también se pueden utilizar desecantes como el magnesio, que reacciona con el agua formando hidrógeno y óxido de magnesio (Giampietro y Mayumi 2009).

f. SÍNTESIS QUÍMICA

El etanol para uso industrial se suele sintetizar mediante hidratación catalítica del etileno con ácido sulfúrico como catalizador. El etileno suele provenir del etano (un componente del gas natural) o de nafta (un derivado del petróleo). Tras la síntesis se obtiene una mezcla de etanol y agua que posteriormente hay que purificar mediante alguno de los procesos descritos más arriba. Según algunas fuentes, este proceso es más barato que la fermentación tradicional, pero en la actualidad representa solo un 5% de la capacidad mundial de producción de etanol (Giampietro y Mayumi 2009).

Dentro del paquete Flow Simulation se encuentra el etanol, con propiedades predeterminadas por el programa, los datos obtenidos en Engineering Database son mostrados en las siguientes figuras.

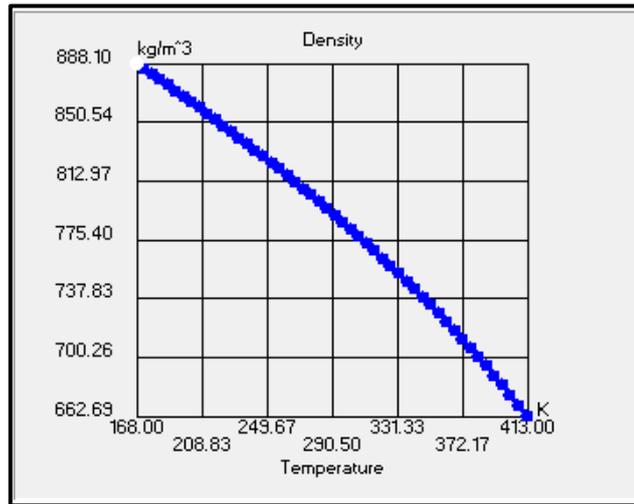


Figura N 3.14 Dependencia de la densidad con la temperatura

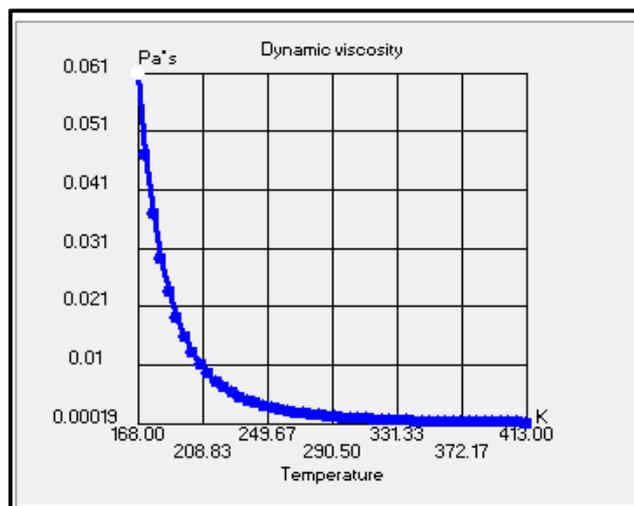


Figura N 3.15 Dependencia de la viscosidad dinámica con la temperatura

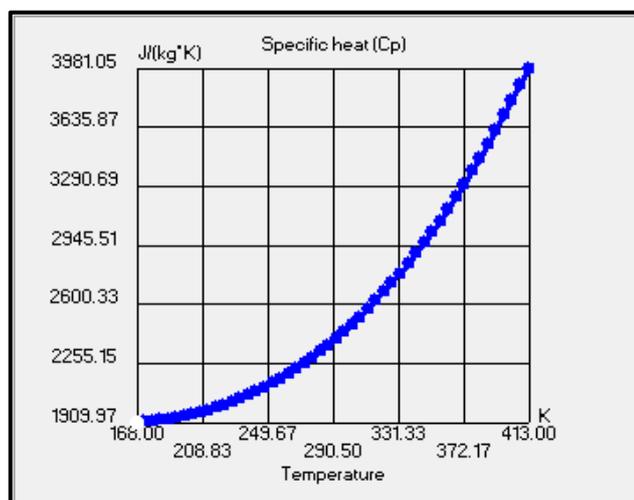


Figura N 3.16 Dependencia del calor especifico con la temperatura

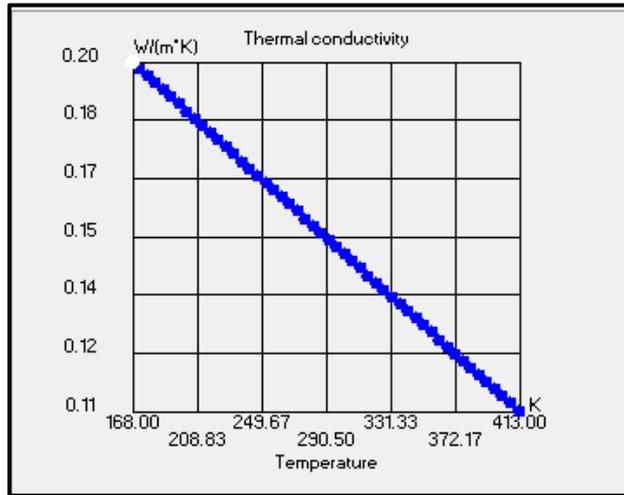


Figura N 3.17 Dependencia de la conductividad térmica con la temperatura

3.2.3. PROPANO

El propano es un hidrocarburo presente en el gas natural o disuelto en el petróleo. Lleva consigo procesos físicos y químicos por ejemplo el uso de metano. Los componentes del GLP, aunque a temperatura y presión ambientales son gases, son fáciles de licuar, de ahí su nombre. En la práctica, se puede decir que los GLP son una mezcla de propano y butano. El propano y butano están presentes en el petróleo crudo y el gas natural, aunque una parte se obtiene durante el refinado de petróleo, sobre todo como subproducto de la destilación fraccionada catalítica (FCC, por sus siglas en inglés Fluid Catalytic Cracking).

Se inicia cuando el petróleo crudo procedente de los pozos petroleros llega a una refinación primaria, donde se obtienen diferentes destilados, entre los cuales se tienen gas húmedo, naftas o gasolinas, queroseno, gasóleos atmosféricos o diésel y gasóleos de vacío. Estos últimos (gasóleos) de vacío son la materia prima para la producción de gasolinas en los procesos de craqueo catalítico. El proceso se inicia cuando estos se llevan a una planta FCC y, mediante un reactor primario a base de un catalizador a alta temperatura, se obtiene el GLP, gasolinas y otros productos más pesados. Esa mezcla luego se separa en trenes de destilación (AMGLP 2016).

El gas natural de propano y butano que pueden ser extraídos por procesos consistentes en la reducción de la temperatura del gas hasta que estos componentes y otros más pesados se condensen. Los procesos usan refrigeración o turboexpansores para lograr temperaturas menores de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ necesarias para

recuperar el propano. Subsecuentemente estos líquidos son sometidos a un proceso de purificación usando trenes de destilación para producir propano y butano líquido o directamente GLP (Amglp 2016).

Uno de los hidrocarburos contenidos en el petróleo crudo y que se separa de los demás durante la refinación. Su fórmula química es C_3H_8 y sus características principales son: punto de ebullición, 45 °C; densidad relativa del propano líquido a 4-15 °C, 0,51; peso específico del propano (gas) a presión y temperatura ambientales, 1,86 kg/m³; poder calorífico superior, 14.980 kcal/kg; poder calorífico superior (líquido), 6.078 kcal/kg; aire necesario para la combustión de 1 kg de propano, 15,8 kg; número de octano (Motor Method), 96. El propano se obtiene en las refinerías durante la destilación primaria de las gasolinas o durante otros procesos de refinación más complicados. Análogamente al butano, el propano posee la característica de que es gaseoso a temperatura y presión ambientales, pero se transforma en líquido al aumentar la presión. En efecto, el propano se comprime y licúa (a 8-12 atm) y, de esta forma, suele almacenarse en bombonas adecuadas, con gran reducción en los costes de transporte y almacenamiento.

El propano comercial contiene trazas de otros hidrocarburos, como etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4), pentano (C_5H_{12}), etc., por lo que posee unas características ligeramente distintas según el crudo del que proceda y el tipo de instalación de producción. Encuentra aplicación en automoción mezclado con el butano en los gases licuados del petróleo.

En cambio, el propano puro se emplea como disolvente en procesos de refinería para la separación de betunes y parafinas, para instalaciones de soldadura y para aplicaciones especiales en las que sea preciso conocer con exactitud las características del comburente, como, por ejemplo, en la industria de fabricación de vidrio y en todas las aplicaciones en que se necesite una llama perfectamente regulable y de características constantes a lo largo del tiempo (fácilmente obtenible con el empleo de propano mediante simples reguladores de presión), (AMGLP 2016).

Dentro del paquete Flow Simulation se encuentra el propano líquido, con propiedades predeterminadas por el programa, los datos obtenidos en Engineering Database son mostrados en las siguientes figuras.

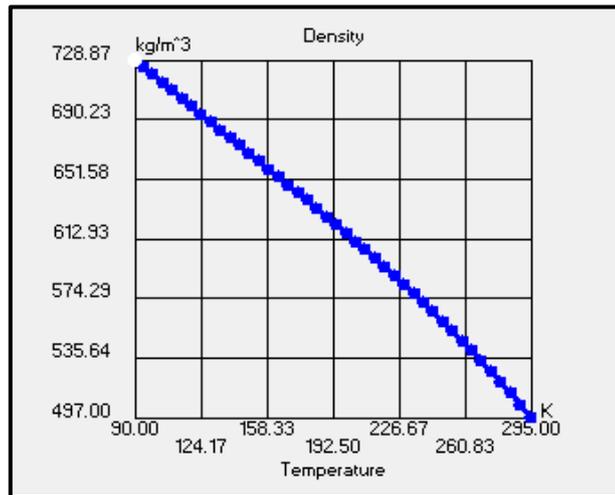


Figura N 3.18 Dependencia de la densidad con la temperatura

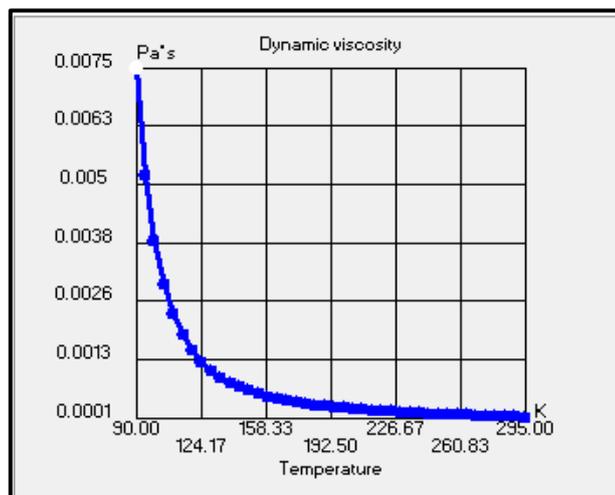


Figura N 3.19 Dependencia de la viscosidad dinámica con la temperatura

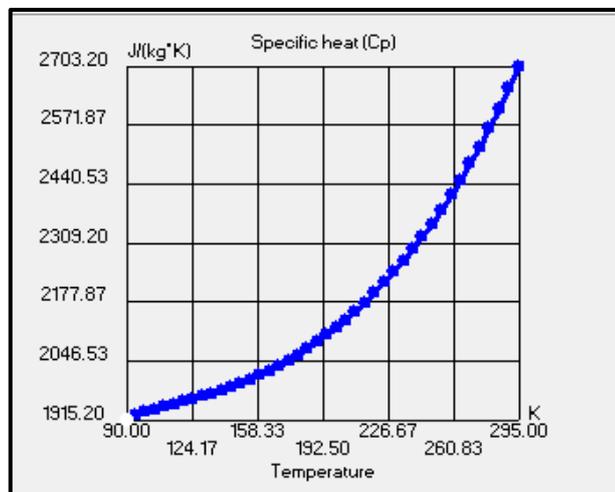


Figura N 3.20 Dependencia del calor específico con la temperatura

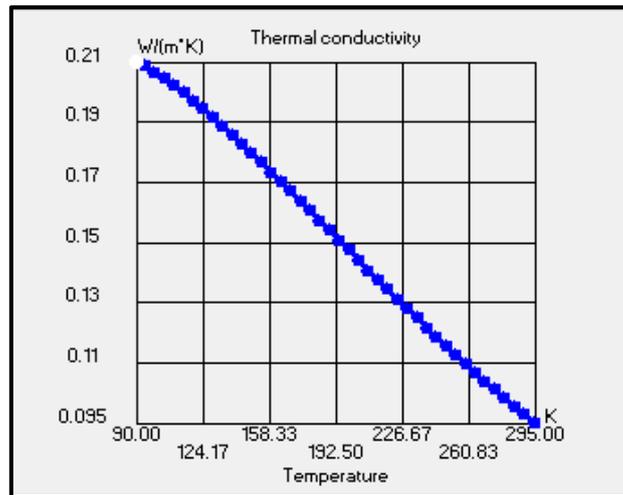


Figura N 3.21 Dependencia de la conductividad termica con la temperatura

CAPITULO IV
RESULTADOS Y DISCUCIONES

4.1. CÁLCULOS DE LOS PARÁMETRO DEL INYECTOR

En este cálculo fue considerado el estudio de caracterización mediante las potencias térmicas realizado por **Chumpitaz Ayala (2016)**, también se tomó en cuenta las consideraciones de los valores de estancamiento para el aire, los que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla N° 4.1 Valores de estancamiento

Parámetros	Valor
To	300 K
Po	3 bar
k	1,4
R	287 J/kg*K

La elección de la potencia fue 5 kW térmicos, donde cuenta con el flujo másico de los combustibles son:

$$\dot{m}_{etanol} = \frac{Potencia}{PCI} = \frac{5 kW}{27000 kJ/kg} = 0.00018518 kg/s$$

Para la relación de flujo másico de gas de atomización y de combustibles (GLR), debe obtener un valor en el rango de 0.05 – 0.15 (Lacava, Carvalho y Mcquay 1998). El GLR usado para los cálculos fue de 0.15, este valor es mayor del rango expuesto por los autores, de tal manera que sea garantizado la mayor cantidad de aire su propio ducto.

$$GLR = \frac{m_g}{m_l} = 0.15$$

$$m_g = 0.15 * 0.00018 \frac{kg}{s} = 0.000027 \frac{kg}{s}$$

Con las condiciones de gas de atomización considerando un régimen crítico, utilizamos las ecuaciones expuestas en la teoría.

Temperatura del aire:

$$T^* = 300 * \left(\frac{2}{1.4 + 1} \right) = 250 \text{ K}$$

Presión del aire:

$$p^* = 300 \left(\frac{2}{1 + 1.4} \right)^{\frac{1.4}{0.4}} = 158.48 \text{ kPa}$$

Densidad del aire:

$$\rho^* = \frac{158.48}{250 * 0.287} = 2.21 \text{ kg/m}^3$$

Velocidad del aire en la entrada de la cámara de mistura:

$$v^* = \sqrt{1.4 * 287 * 250} = 316.94 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Diámetro de la boquilla del inyector del aire:

$$A_g = 2.7 * 10^{-5} * \frac{\sqrt{287 * 250}}{3 * 10^5 \sqrt{1.4}} \left(\frac{2}{1.4 + 1} \right)^{-\frac{1.4+1}{2(1.4-1)}} = 3.5207 * 10^{-08} \text{ m}^2$$

$$d_g = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 3.5207 * 10^{-08}}{\pi}} = 2.113114 * 10^{-04} \text{ m}$$

La presión de inyección del combustible y velocidad de inyección del mismo son hallados por con un $C_d = 0.75$.

$$P_{ic} = \left(\frac{0.00018}{0.75 * 3.5207 * 10^{-08}} \right)^2 * \frac{1}{2 * 790.5} = 29392.2324 \text{ Pa}$$

$$v_{ic} = 0.75 * \sqrt{\frac{2 * 29392.2324}{790.5}} = 6.4675 \text{ m/s}$$

Los datos calculados para la potencia térmica de 5 kW térmicos son mostrados a en la tabla N°02.

Tabla N° 4.2 Valores Calculados para una Potencia de 5kW

Parámetros	Potencia térmica de 5 kW
m_{Comb}	0.00018518 kg/s
m_g	0.000027 kg/s
T^*	250 K
p^*	158484.54 Pa
ρ^*	2.21 kg/m ³
v^*	316.94 m/s
A_g	$3.5207 * 10^{-08} m^2$
d_g	$2.113114 * 10^{-04} m$
p_{ic}	29392.2324 Pa
v_{ic}	6.4675 m/s

Los parámetros representados en la tabla 4.2 fueron esbozados en el programa Solidworks 2016 y AutoCAD 2016. En general al inyector tipo Y lo conforman dos piezas: la boquilla y la carcasa. En el proceso de atomización solo influencia la boquilla, este cuenta con las medidas de A_g , de $3.5207E-08 m^2$ y un diámetro de ducto $2.113114E-04 m$. Las dimensiones específicas de la boquilla son calculadas por el método de **Millinger y Chigier (1974)**, los cuales se muestran en la tabla N°4.3 y graficadas en la figura N°4.1.

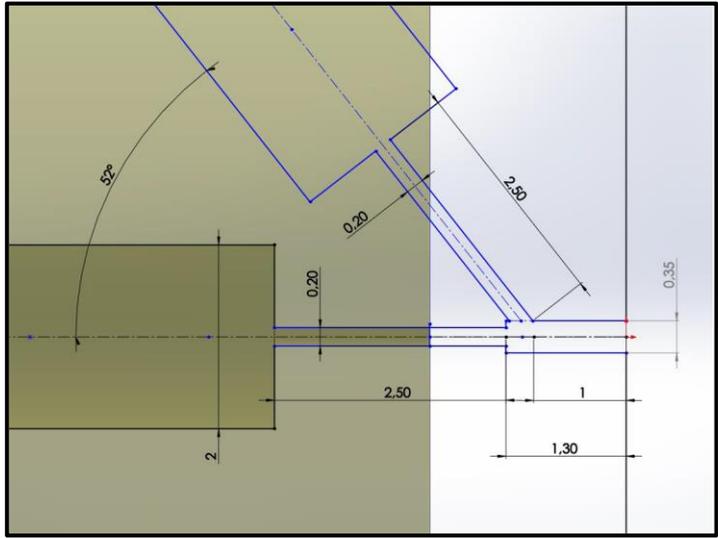


Figura N° 4.1 Dimensiones del inyector de 5 kW, Chumpitaz (2016).

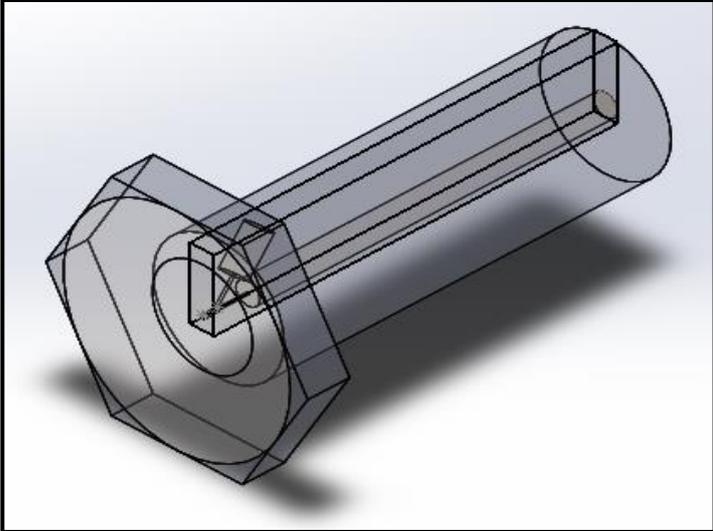


Figura N° 4.2 Vista Isométrica del inyector tipo Y de 5 kW.

Tabla N° 4.3 Valores adoptados en el dimensionamiento del inyector tipo Y de 5 kW.

Parámetro	Recomendado	Adoptado	5 kW
1. Diámetro de la línea de atomización, d_g (mm)	d_g	d_g	0.2
2. Diámetro de conducto de alimentación de combustible, d_l (mm)	$d_g = d_l$	$d_g = d_l$	0.2
3. Diámetro de cámara de mistura, d_m (mm)	$d_M = (1.4 - 1.8)d_g$	$d_M = (1.6)d_g$	0.35
4. Longitud de pre-mistura, L (mm)	$L = (1 - 2)d_g$	$L = (1.5)d_g$	0.3
5. Longitud de mistura, L_m (mm)	$L_M = (4 - 5)d_g$	$L_M = (4.5)d_g$	1
6. Longitud total de cámara de mistura, L_t (mm)	$L_T = L + L_M$	$L_T = L + L_M$	1.3
7. Longitud del conducto de alimentación de gas de atomización, L_g (mm)	$L_g > 2d_g$	$L_g = 12.5d_g$	2.5
8. Longitud del conducto de alimentación del combustible, L_l (mm)	$L_L > 2d_g$	$L_L = 12.5d_g$	2.5
9. Angulo del conducto de combustible, θ °	θ	θ	52

Los planos para la construcción virtual del inyector se encuentran en los Anexos N° 01.

4.2 INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE ESTANCAMIENTO EN EL FLUJO MÁSSICO.

Para el estudio de manera individual de la presión sobre el caudal y velocidad de cada fluido, fue necesario esbozar el inyector tipo Y, según los parámetros calculados en el anterior ítem. La materia usada en el Software fue de acero inoxidable, el combustibles ya sea etanol o propano, individualmente pasa por el conducto que forma 52° con respecto del eje horizontal y el aire pasa por el conducto horizontal, ambos se encuentran en la cámara de mistura donde sale la combinación de los dos y se origina el spray.

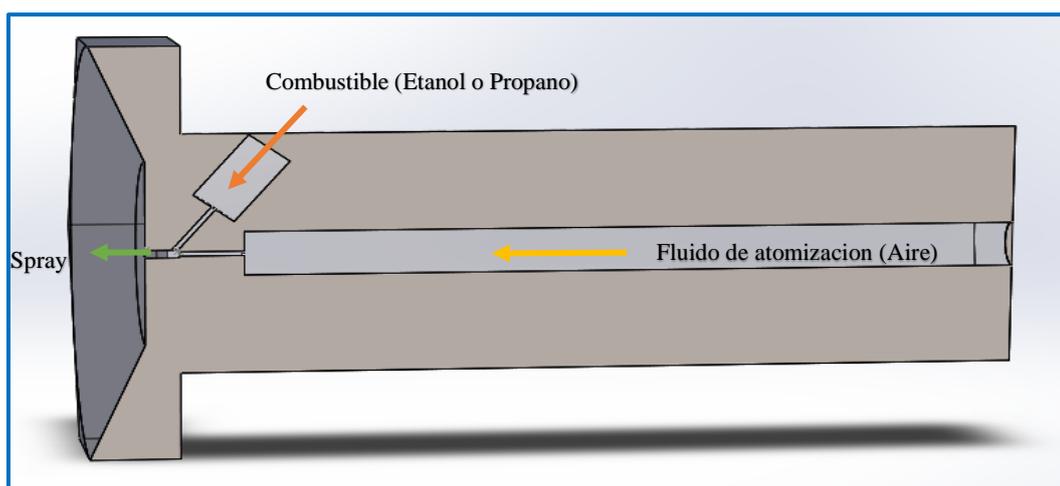


Figura N° 4.3 Detalles del ingreso de fluidos en el inyector tipo Y

Inicialmente, cada línea del atomizador fue probada, independientemente una de la otra, bajo las condiciones de geometría dada del inyector y presión ambiente constante. La presión absoluta de la inyección del líquido se suministra en el rango de 100 a 500 kPa, mientras que la presión de gas fue en el rango de 100 a 650 kPa. En cada línea se ha leído la máxima presión de estancamiento, velocidad, además del caudal másico de gas y de combustible. Para cada caso se hizo fluir únicamente el combustible por su línea para observar su comportamiento independiente del suministro del fluido auxiliar.

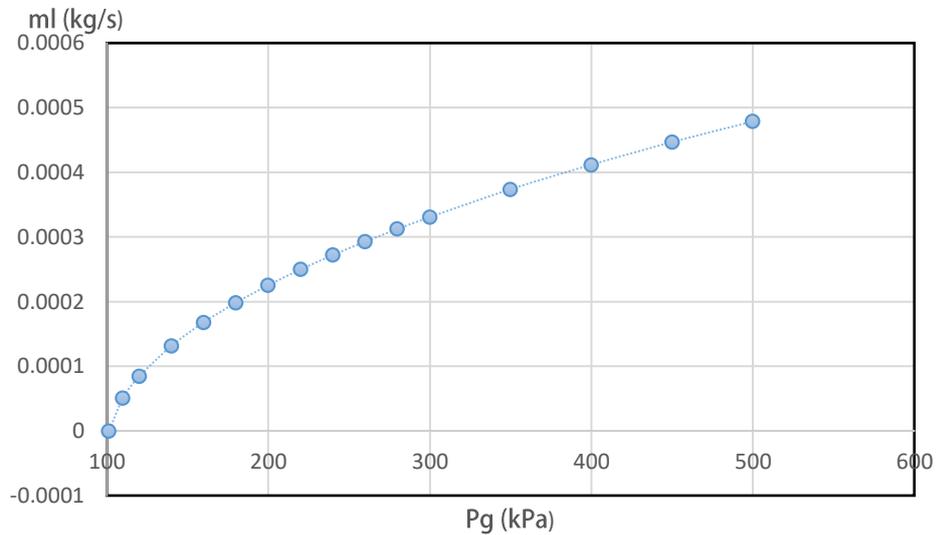


Figura N° 4.4 Dependencia de flujo másico de etanol con la presión de estancamiento del combustible.

El etanol, por ser el más viscoso, requirió de una mayor presión de estancamiento (presurización en el tanque de combustible) siendo también mayor la presión de inyección. Se observa que para ambas gráficas, del etanol y propano, el comportamiento del flujo másico es exponencial, cuando la presión de estancamiento aumenta la el flujo tiende a estilizarse y la pendiente disminuye, mientras que cuando la presión se acerca a valores del ambiente 101.325 kPa, el flujo decrece drásticamente. Por motivos de las propiedades físicas, el etanol es más complicado de transportar ya que la viscosidad y tensional superficial son mayores, generando estos un decaimiento del campo de velocidad.

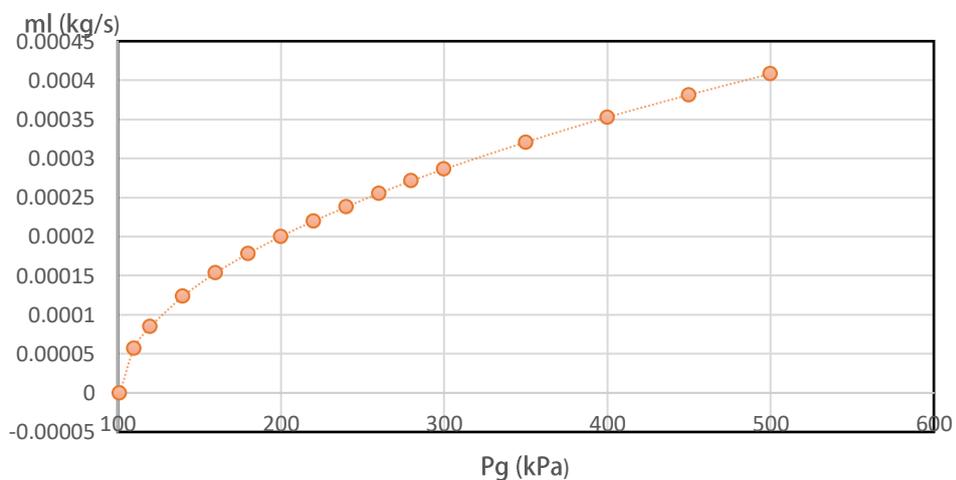


Figura N° 4.5 Dependencia del flujo másico de Propano con la presión de estancamiento del combustible.

El caso del caudal de gas de atomización merece un análisis particular. El caudal de gas a través del inyector no dependía del tipo de líquido usado en la atomización; él está sujeto simplemente a la contrapresión en la cámara de mezcla. Para caracterizar el inyector se utilizó aire como gas de atomización en la Fig. 4.6, donde se presenta la dependencia del caudal de aire y de la velocidad de inyección para la cámara de mezcla con la presión de inyección del aire, cuando el flujo se considera como adiabático y isentrópico. Como se puede ver en la Fig. 4.6, cuando se aumenta la presión de inyección en la línea del suministro de aire se produce un incremento en el caudal másico de aire. En esta figura, también se observa que, inicialmente, la velocidad del flujo aumenta rápidamente y luego desacelera su crecimiento. La velocidad fue medida en la salida del conducto de aire, mejor dicho cuando ingresa a la cámara de mezcla, espacio donde se combinarán en las siguientes graficas los dos fluidos, combustible-aire. Las velocidades cercanas al régimen sónico, estado en el que alcanzan valores cercanos a 340 m/s, se desarrollan en presiones de estancamiento muy elevadas como lo es en la faja de 550 a 700 kPa. Este estado es el adecuado según consideraciones hechas en el dimensionamiento del inyector, ya que permite lograr valores de diámetros de gotas más adecuados en el spray.

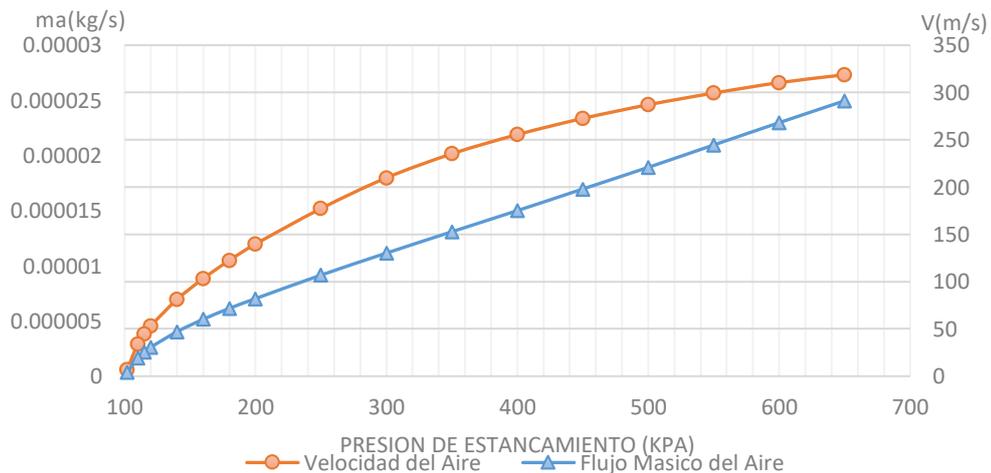


Figura N° 4.6 Dependencia de flujo másico y velocidad de inyección del aire

Estos fenómenos observados en la línea de suministro de gas permiten entender la influencia del gas en el mecanismo de rotura del chorro líquido. La máxima velocidad

alcanzada por el flujo de gas se produce en la salida de la boquilla (entrada a la cámara de mezcla). Tan pronto como salga de, se produce una caída de presión debido a la expansión brusca entre la salida de la boquilla y la entrada para la cámara de mezcla. Al llegar al punto en que la mezcla se encuentra con el chorro líquido, se produce una transferencia de cantidad de movimiento del chorro de gas al chorro líquido, que permite la ruptura primaria, y se genera un flujo bifásico, que se mueve hacia la salida de la cámara de mezcla. En la salida de la cámara, el flujo bifásico está sobre-expandido y la expansión sigue fuera de la cámara (en el medio ambiente), posibilitando la ruptura secundaria (Quispe 2013).

4.3. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES SOBRE EL RÉGIMEN DE OPERACIÓN

Las Fig. 4.7 y Fig. 4.9 presenta la dependencia del caudal másico de líquido y de gas de atomización cuando la presión de inyección de líquido se mantiene constante. Se han experimentado dos casos, cuando la presión de líquido era 300 kPa absolutos y 400 kPa absolutos.

Cuando la presión de inyección de líquido permanece constante, con el aumento de la presión de la inyección de gas de atomización disminuyó el flujo de líquido, mientras que el caudal de gas de aumenta la atomización. La explicación para ello es que, aumentando la presión de inyección del gas, se aumenta la presión en el punto de mezcla, lo que limita la entrada de líquido y lleva a una disminución del caudal de combustible para la cámara de mezcla.

El aumento gradual del caudal másico de gas se puede explicarse si se analiza la ecuación de continuidad en la forma diferencial: $d\rho/\rho + dV/V + dA/A = 0$. La geometría del inyector es sin cambios, siendo de $dA/A \ll 1$ (contracción en la boquilla). Como el flujo acelera al pasar por el paso que provoca un incremento en la velocidad, es necesario que la masa específica disminuya para asegurar el caudal constante. Es sabido que en un proceso de expansión isentrópica, tanto la presión como la masa específica disminuyen, sólo que la disminución de la masa específica es menor que el aumento de la velocidad, siendo necesaria una reducción drástica del área del conducto en la salida de la boquilla para compensar este efecto. También se puede observar que cuanto mayor sea la presión de inyección del etanol o propano, mayor será el rango de caudal de combustible inyectado en estas condiciones. Además, se observa que cuanto menor sea la presión de inyección del líquido, menor es el rango

de presión necesaria en la línea de suministro de gas de atomización. Se observó también que para cada uno el valor de presión de inyección establecido corresponde a una presión de estancamiento y un caudal en particular para el gas y el líquido. Como se puede ver en la condición de inyección de combustible a presión constante no garantiza que el caudal de líquido sea constante.

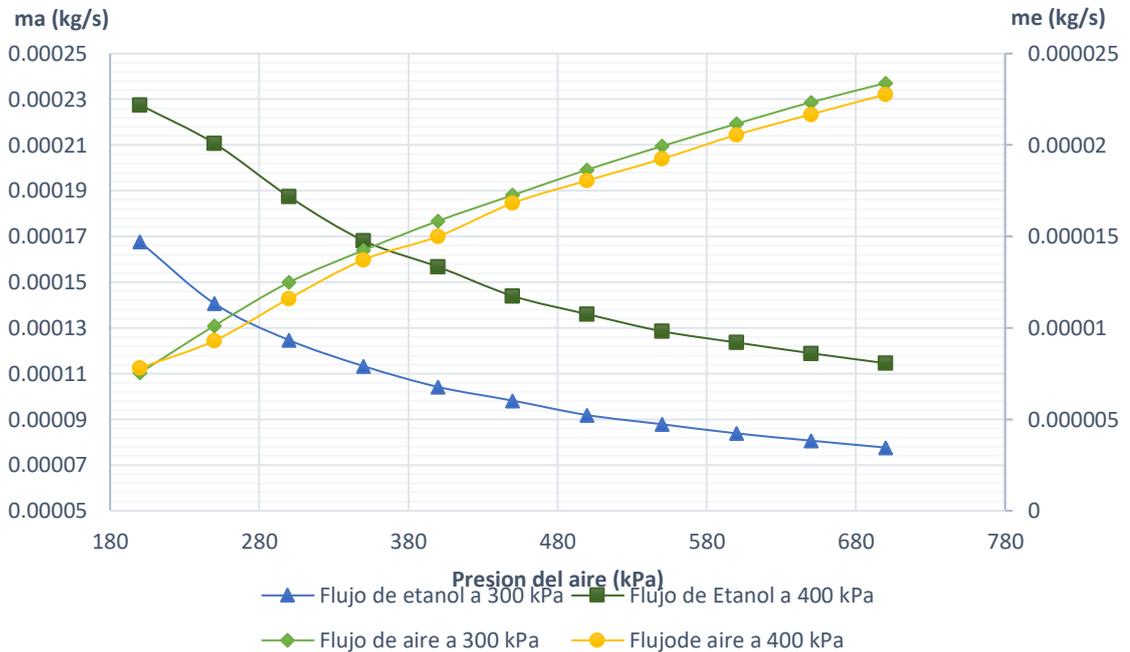


Figura N° 4.7 Dependencia del flujo de Etanol y aire con la presión de estancamiento del aire, sobre la condición $P_1 = \text{cte}$ (Etanol).

Las Fig. 4.8 y Fig. 4.10 muestra la dependencia de la velocidad del gas en la salida de la boquilla (entrada para cámara de mezcla) y el número de Mach en esta sección, con la presión de inyección del gas. En esta ocasión es fácil poder apreciar que tanto la velocidad como el número de Mach tienen comportamientos similares. De estas figuras se puede concluir que cuanto menor es la presión de inyección del líquido (menor caudal de líquido), el rango de presión necesario en la línea de suministro de gas para alcanzar una atomización de calidad se encuentra en la zona de valores bajos (menor caudal de gas para atomizar el líquido).

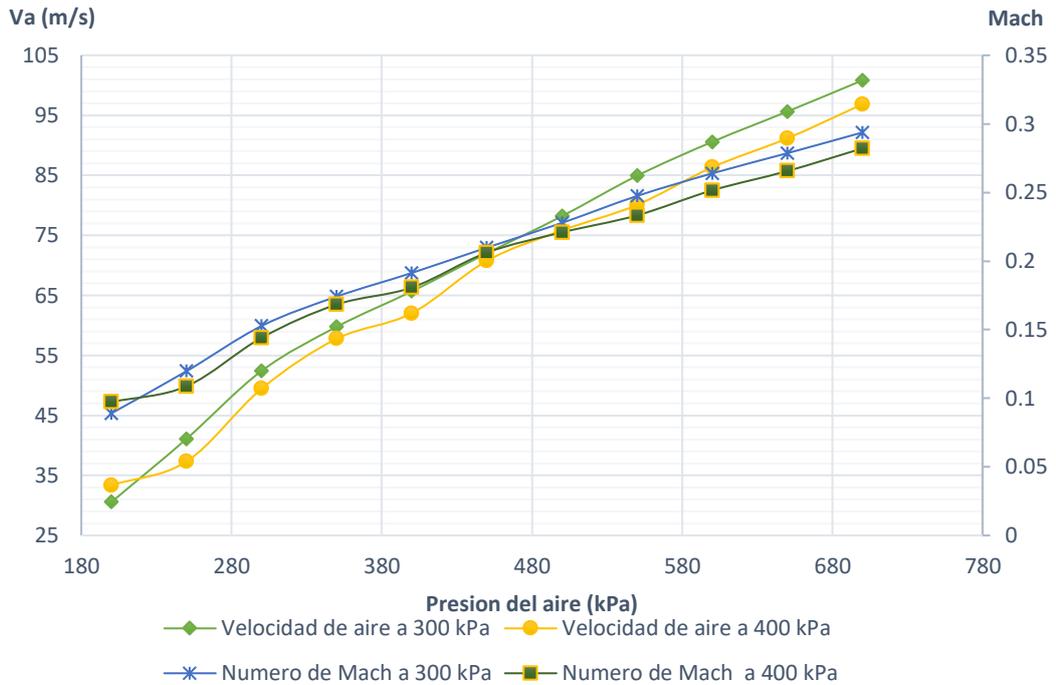


Figura N° 4.8 Dependencia de la velocidad del aire y del número de Mach en la salida de la boquilla con la presión de estancamiento del aire, sobre condiciones de $P_1=Cte.$ (Etanol)

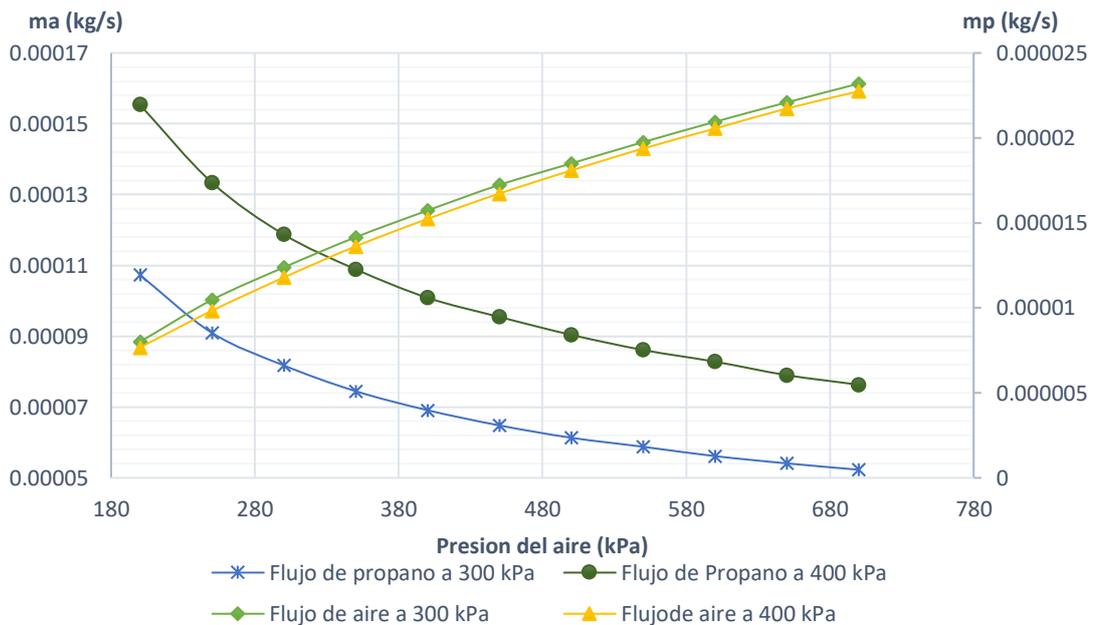


Figura N° 4.9 Dependencia del flujo de Propano y aire con la presión de estancamiento del aire, sobre la condición $P_1=Cte.$ (Propano).

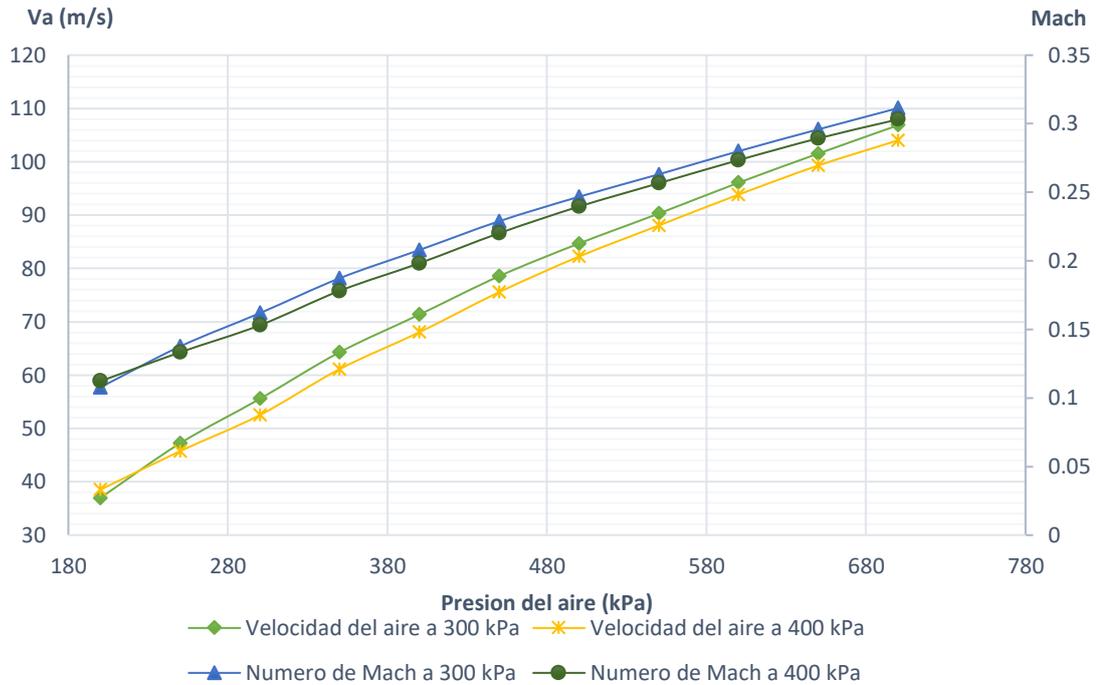


Figura N° 4.10 Dependencia de la velocidad del aire y del número de Mach en la salida de la boquilla con la presión de estancamiento del aire, sobre condiciones de $P_l = \text{cte}$ (Propano).

Para esta tesis también se realizaron varias pruebas manteniendo el caudal masico de líquido constante. Para los siguientes resultados se brindaron nuevas condiciones de frotencia, en la fig. 4.11 se aprecia que primeramente se realiza pruebas variando la presión de inyección del aire y dejando constantes el suministro de combustible. Este proceso primero se realiza para el etanol a 0,2 y 0,15 g/s y aparte para el propano con las mismas cantidades de flujo masico. La Fig. 4.12 y Fig.4.13 presenta los resultados experimentales de la dependencia del caudal y de la presión de inyección de gas con la presión de inyección del líquido, bajo la condición de $m_l = \text{constante}$. Se mantuvo constante e igual a 0.15 y 0.2 g/s, para ambos casos particulares, usando etanol y aparte propano. De donde se puede notar que cuanto mayor es el caudal, mayor es la presión de líquido requerida. Cuando aumenta la presión de inyección del líquido, aumenta el flujo de líquido y el caudal de gas de atomización. En consecuencia, la presión de inyección del gas debe aumentar.

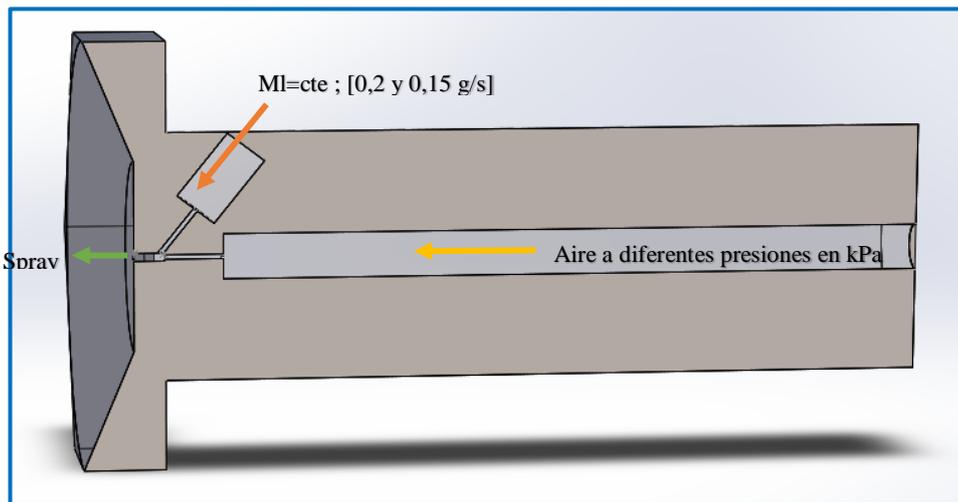


Figura N° 4.11 Condiciones de frontera para a ml=cte [0,2 y 0,15 g/s] de combustibles

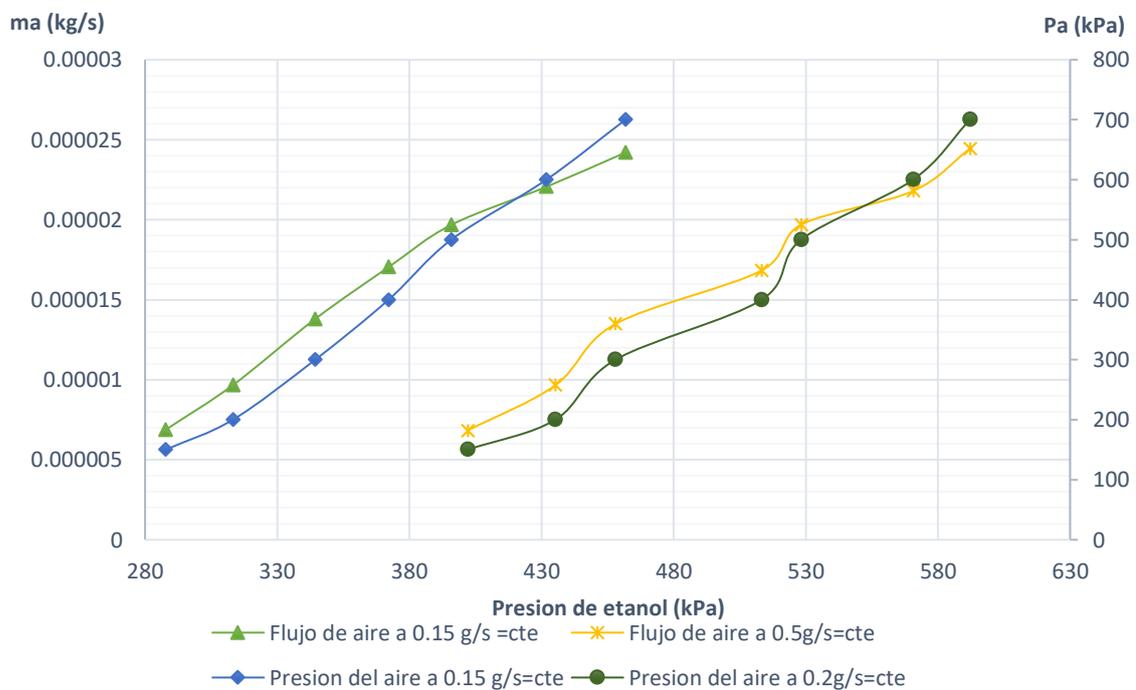


Figura N 4.12 Dependencia de flujo y de presión de estancamiento de aire, con la presión de Est. del Etanol, sobre la condición ml=cte (Etanol).

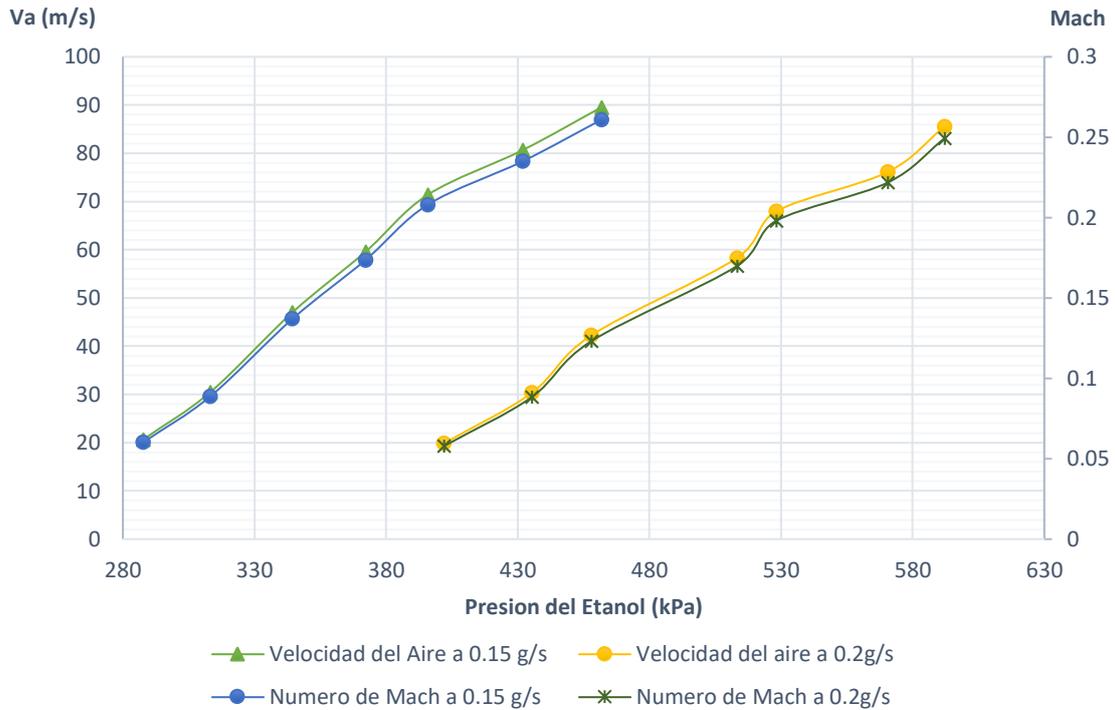


Figura N° 13 Dependencia de la velocidad y del número de Mach del aire en la salida de la boquilla, con la presión de inyección de Etanol, sobre la condición ml=cte (Etanol).

De la Fig. 4.13 y Fig. 4.15 se observa que la velocidad de inyección del gas y el número de Mach en la sección de salida de la boquilla (entrada para la cámara de mezcla) aumentan cuando aumenta la presión de la inyección del combustible, teniendo ambas propiedades comportamientos similares. La Fig. 5.12 presenta los datos experimentales de la dependencia del caudal másico y la presión. En ambas graficas se aprecia que cuando los fluidos ya se encuentran en contacto generan una presión en la cámara de mistura, la cual no permite llegar a velocidades cercanas al sonido como en la Fig. 4.6, donde solo actuaba el aire. Las velocidades de este fluido auxiliar se ven afectadas por este fenómeno que ocurre en la cámara de mistura. Además vale recalcar que cuando queremos lograr una velocidad adecuada en el aire, para generar un óptimo atomizado es necesario mayor presión para el propano, trabajando a flujo másico constante, creando así un mayor consumo de energía en la bomba del combustible.

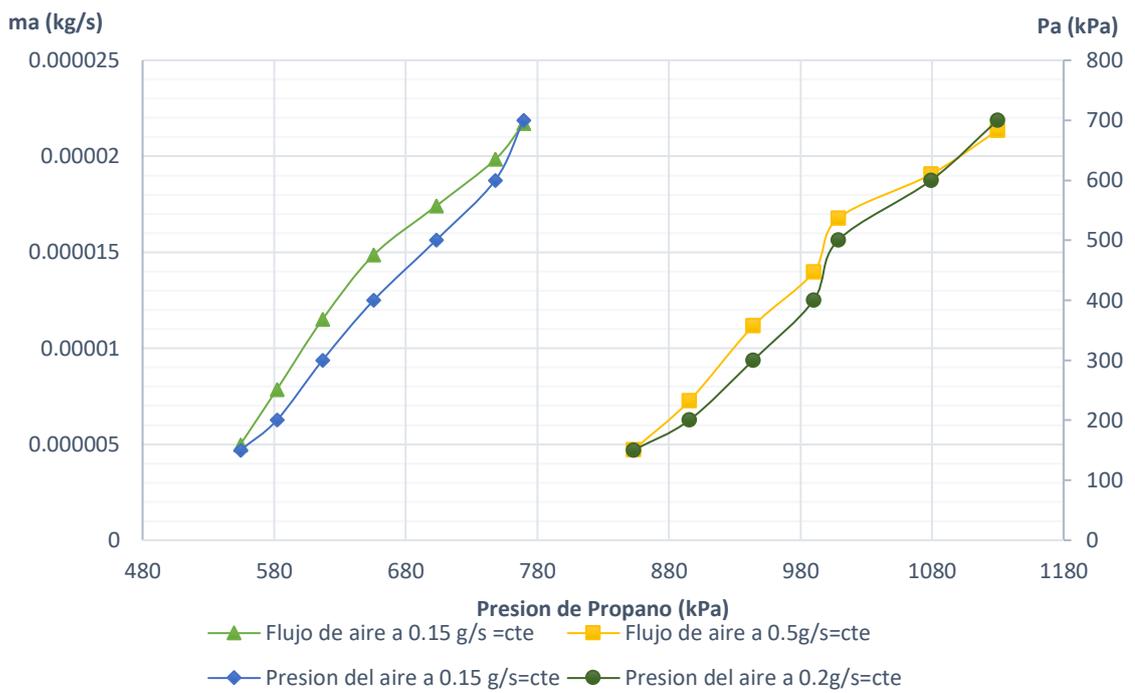


Figura N° 14 Dependencia de flujo y de presión de estancamiento de aire, con la presión de Est. del Propano, sobre la condición ml=cte (Propano).

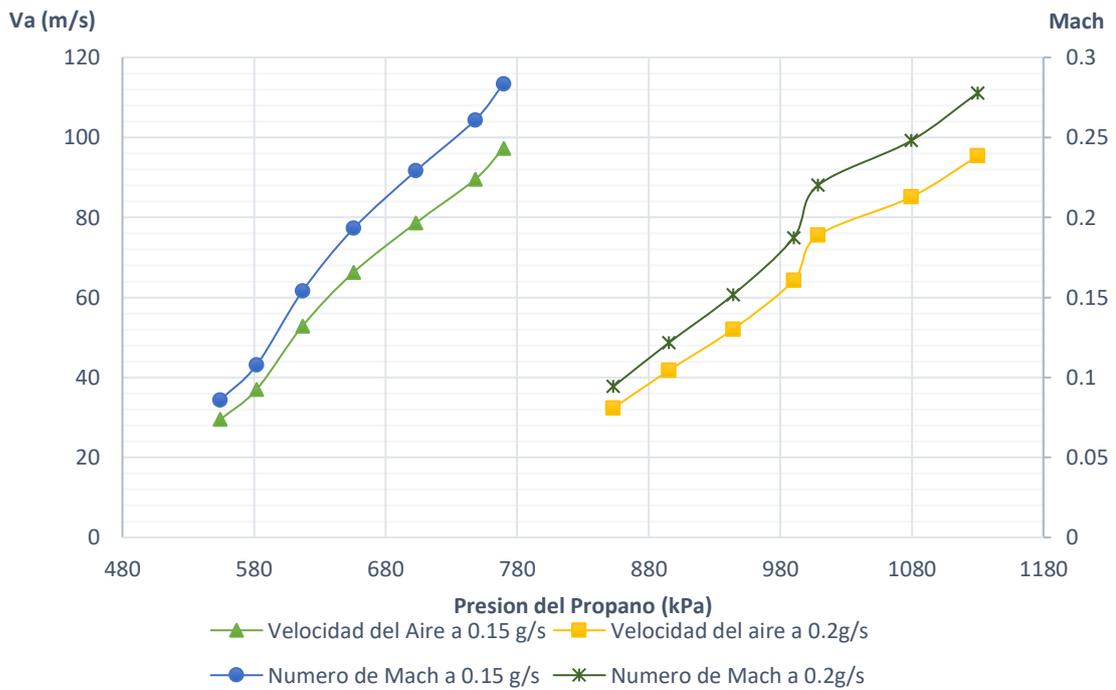


Figura N° 15 Dependencia de la velocidad y del número de Mach del aire en la salida de la boquilla, con la presión de inyección del propano, sobre la condición ml=Cte. (Propano)

4.4 RAZÓN MÁSCICA GAS/ LIQUIDO (GLR)

El GLR es una ratio muy relevante en el proceso de combustión y el atomizado, este nos permite lograr resultados eficientes en la operación de equipos térmicos. En esta etapa de resultados se midieron los respectivos flujos y presión de estancamiento de ambas fuentes de suministro, para así obtener los datos requeridos. Para cada valor establecido de presión de inyección de gas se midió el caudal másico. Por otro lado, en la línea de combustible, se registraron la presión de inyección y el caudal de combustible y luego se calculó un caudal másico del combustible.

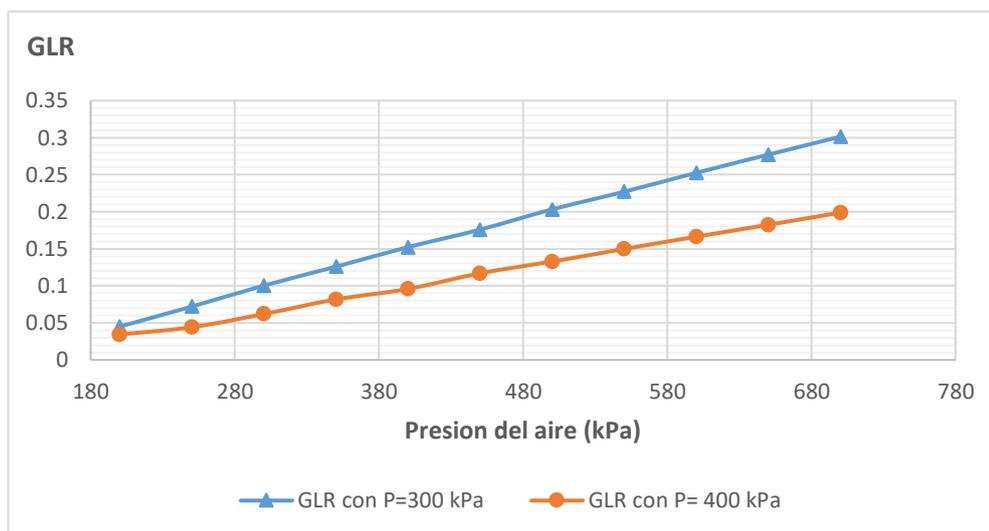


Figura N° 4.16 Curva GLR en función de la presión del aire, sobre la condición de $P_l=Cte.$ (Etanol).

Las Fig. 4.16 y Fig. 4.19 muestra que la razón GLR aumenta al incrementarse la presión de inyección del gas de atomización. Esto es coherente con la teoría del flujo compresible, ya que, al incrementarse la presión de inyección, el caudal de gas también debe aumentar, lo que aumenta la proporción de GLR. Las presiones de estancamiento del combustible condicionan inversamente proporcional al GLR, este disminuye en consecuencia del aumento de la presión de combustible y del aire. Este comportamiento hace notar que, al querer llegar a buenos valores de GLR, de 0,05 a 0,15 según (Lacava, Carvalho e Mcquay, 1998), es mejor realizarlo con presiones bajas de inyección del combustible, ya que la pendiente de este es mayor y permite que el dominio de los parámetros de inyección de aire sea menor. Mientras que a mayores presiones de combustible la pendiente disminuye teniendo en consecuencia el amplio dominio de presiones de estancamiento para el aire, generando así la compra de

equipos con un amplio régimen de trabajo, haciendo referencia a las presiones del combustible y sobre todo del aire, lo cual influye en las inversiones económicas de adquisición. Es importante hacer mención que al operar con el combustible propano las pendientes se vuelven mayores generando un menor dominio de trabajo con las presiones de estancamiento del aire.

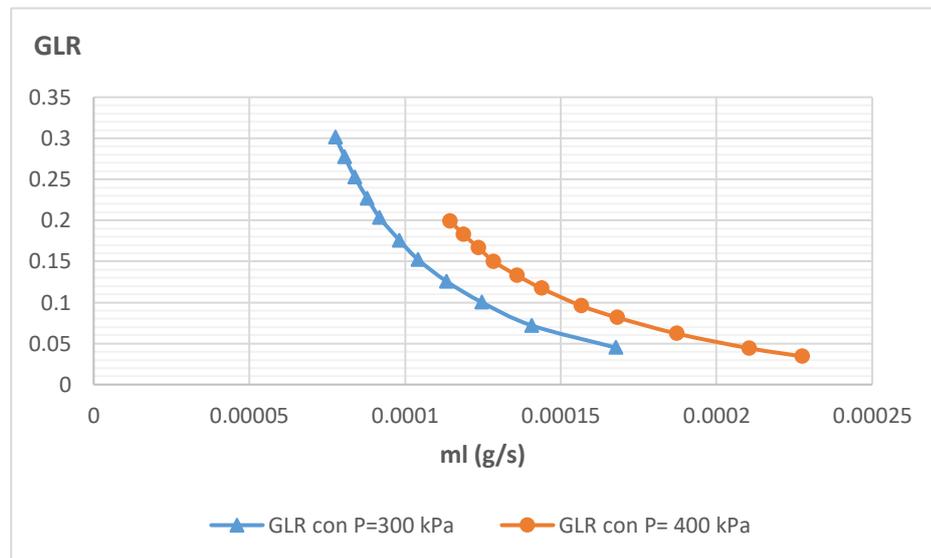


Figura N° 4.17 Curva GLR en función del flujo del Etanol, sobre la condición de $PI=Cte.$ (Etanol).

En las Fig. 4.17 y Fig. 4.20 presenta los datos experimentales de la dependencia de la razón GLR con el caudal cuando la presión del combustible es constante. Cuando suceden las condiciones mencionadas, la razón GLR disminuye cuando aumenta el flujo de líquido. Esto es coherente a lo siguiente, para aumentar el caudal de líquido se debe disminuir la presión del gas de atomización y, consecuentemente, disminuye el caudal de gas de atomización, lo que lleva a disminuir el GLR. Además, se puede notar que la razón GLR será menor cuanto menor sea la presión de inyección del líquido.

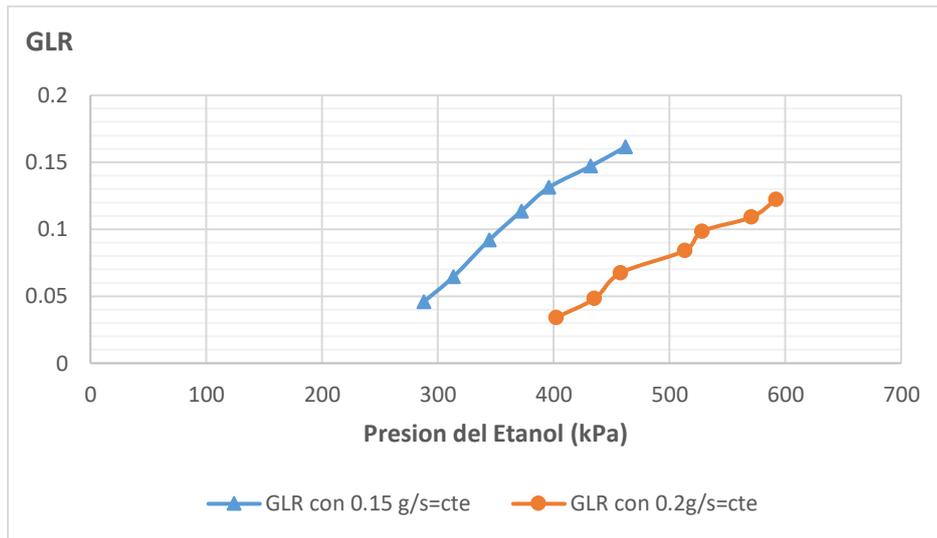


Figura N° 4.18 Curva GLR en función de la presión del combustible, sobre la condición de ml=Cte. (Etanol).

Las Fig. 4.18 y Fig. 4.21 presenta los datos de la simulación de la dependencia de la razón GLR con la presión de inyección del líquido cuando el flujo de líquido a través del inyector permanece constante. Como se puede observar, el incremento de la presión de inyección de líquido se debe al incremento de la presión de inyección presión de inyección del gas de atomización, incrementándose el caudal de gas y, consecuentemente, la razón GLR, de esta manera se garantiza el alcance del caudal deseado

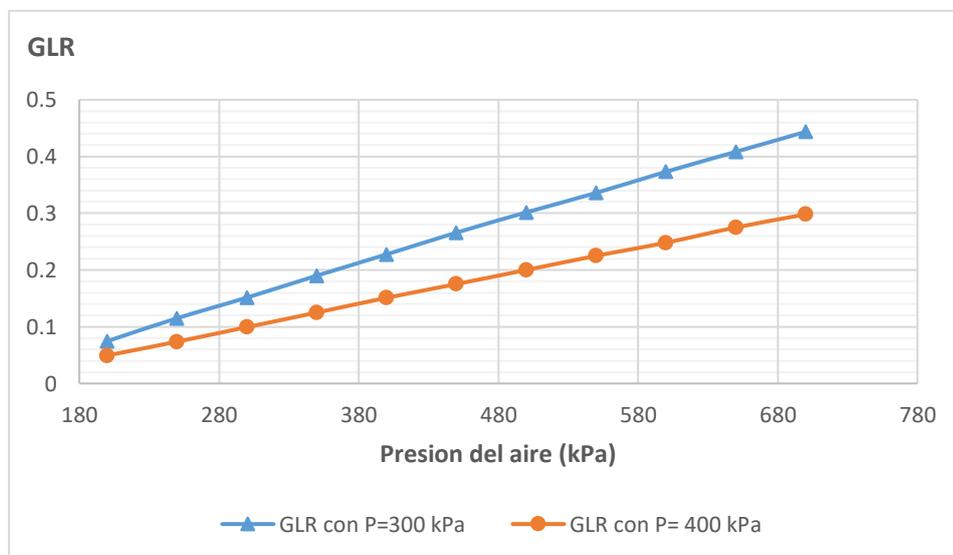


Figura N° 4.19 Curva GLR en función de la presión del aire, sobre la condición Pl.=Cte. (Propano)

5. DIÁMETRO REPRESENTATIVO DE GOTAS

En el presente ítem se estudiará la variable más importante para analizar el desempeño de la atomización. El diámetro másico medio de gota, nos ayudará a poder evaluar la calidad de la atomización, sus unidades se encuentran en el orden de los μm y para que se desempeñe bien necesita alcanzar valores menores a $80 \mu\text{m}$. Para evaluar el diámetro másico medio de gota se hizo uso de la formular propuesta por (Wigg 1964), esta fórmula expresada previamente ayudará a encontrar los rangos de operación adecuados para obtener un óptimo desempeño del inyector en la atomización.

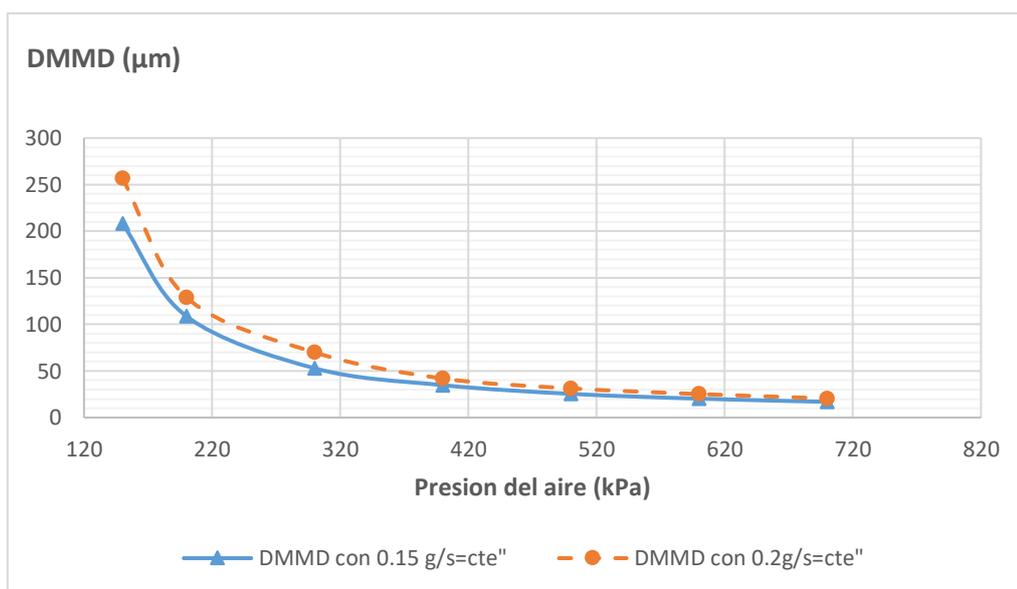


Figura N° 4.22 Influencia de la presión del aire en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición ml=Cte. (Etanol).

En la fig.4.22 y fig.4.27 se procedió a simular las condiciones de flujo másico constante para el etanol y propano respectivamente, en estas graficas se puede observar que cuando la presión de estancamiento del aire tiende a presiones más altas el diámetro medio de gota disminuye en proporciones casi-lineales, estos valores al parecer son adecuados pero cabe recalcar que el exceso de aire puede generar una mala combustión en el futuro. Para ambas graficas existe un comportamiento exponencial cuando las presiones del aire son cercanas a la presión ambiental esto nos refleja que no es aconsejable usar en la operación presiones pequeñas ya que no obtendríamos buenos resultados. Para el caso del etanol, la presión de estancamiento del aire adecuado sería mayores a 270 kPa y mientras que para el propano sería mayores a 150

kPa. Para ambos casos a medida que aumentamos el flujo másico de combustibles los valores de diámetro tienden a disminuir. Por lo tanto, cuando queramos atomizar mayor flujo de combustible será necesario mayor energía cinética del aire. El balance adecuado entre ambas masas lo estudiaremos en las gráficas donde involucre el GLR, el cual nos ayudara a entender de una manera más clara las proporciones másicas.

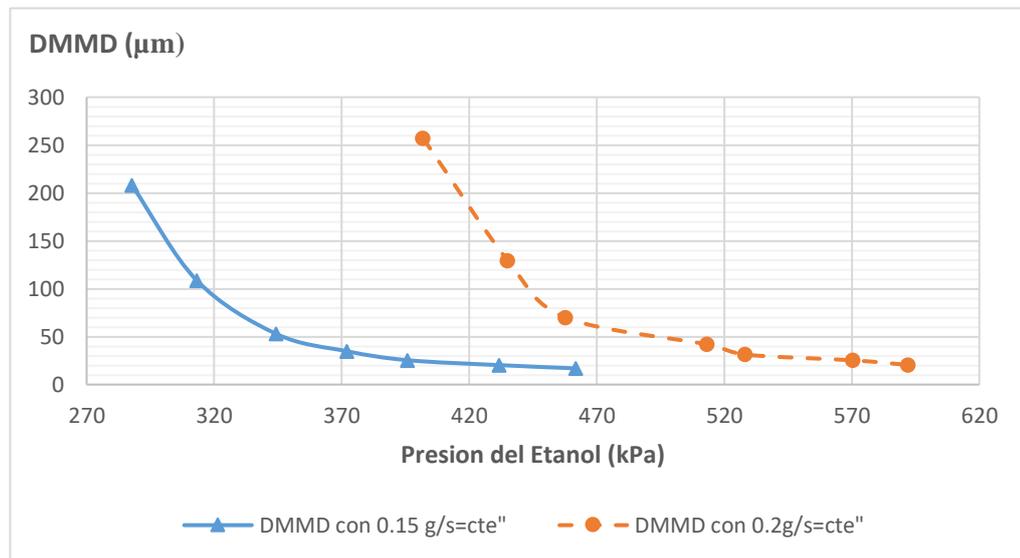


Figura N° 4.23 Influencia de la presión de Etanol en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición de ml=Cte.

Las Fig.4.23 y Fig.4.28 muestran los resultados de la simulación con condiciones de flujo de combustible constante, donde se evalúa la influencia de la presión de estancamiento del combustible. Para poder garantizar un flujo constante de combustible es necesario aumentar la presión del mismo, ya que de acuerdo con la presión de estancamiento de aire a la que estamos trabajando determinara la nueva presión de combustible. En ambas graficas se nota que, para poder obtener buenos diámetros de gota, es necesario aumentar la presión del combustible. Sin embargo, para alcanzar un diámetro óptimo de atomización a mayores tasas de flujo de combustible, el salto de presión es muy elevado.

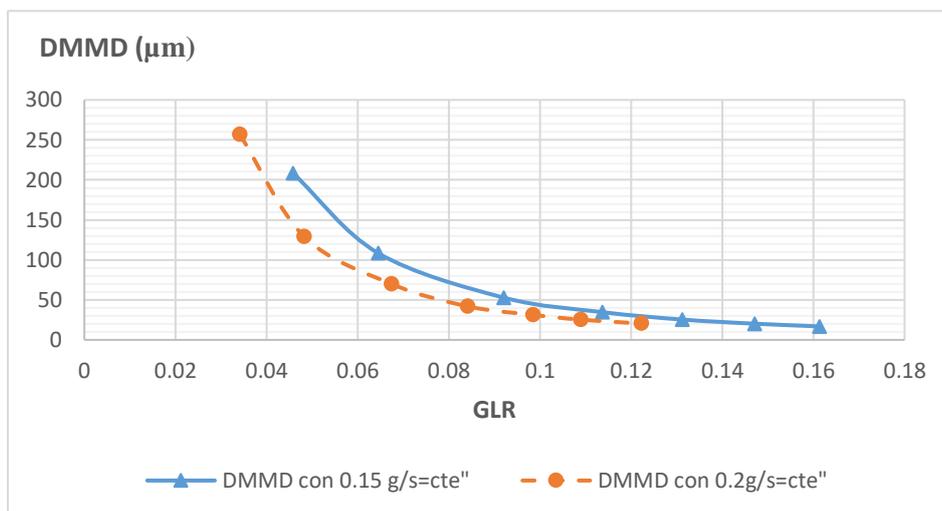


Figura N° 4.24 Influencia del GLR en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición de ml=cte (Etanol).

Las Fig.4.24 y Fig.4.29 muestran los resultados de la simulación del inyector trabajando con etanol y propano respectivamente, operando a flujo de combustible constante, y variando el flujo de aire para apreciar la influencia del GLR en el diámetro medio de gotas, evaluado con la ecuación de Wigg. En donde se aprecia que para el etanol y propano, cuanto menor sea el flujo de combustible más fácil será llegar a un óptimo atomizado, mientras cuando este aumente, la energía que porta el aire deberá ser mayor para poder obtener resultados de diámetro menores a 80 μm. Para el etanol desde valores de 0.06 hasta 0.12 de GLR se obtienen valores adecuados de diámetros. Para el propano desde valores muy bajos, como de 0.02 de GLR, se logran diámetros menores a 80 μm. En ambos casos es mejor trabajar con flujo de combustible bajos para lograr mejores atomizados y gastar menos energía para el suministro del aire.

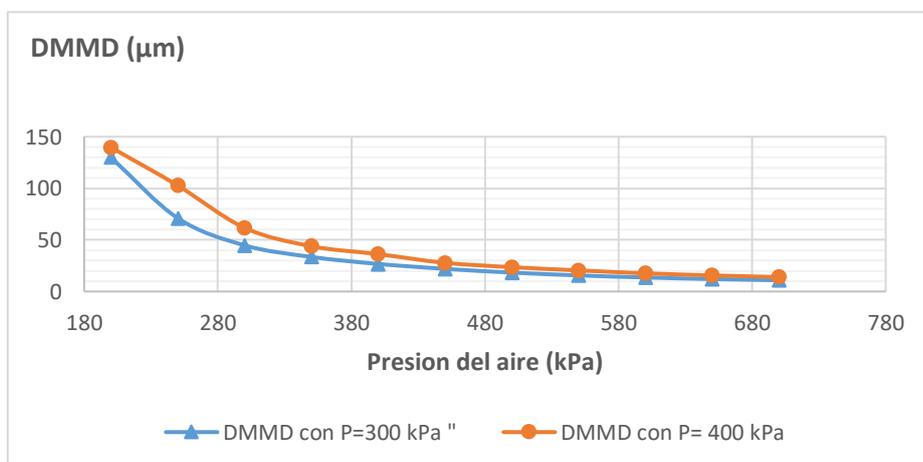


Figura N° 4.25 Influencia de la presión del aire en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición Pl=cte (Etanol).

Las Fig.4.25 y Fig. 4.30 muestran los resultados de las simulaciones realizadas en el inyector tipo Y, teniendo como condición de frontera la presión de estancamiento del combustible, y variando en el eje x la presión de estancamiento del aire. Trabajando con el etanol y propano, por separado, se aprecia que es más difícil llegar a diámetros adecuados cuando operamos a presiones de estancamiento altas. Este comportamiento se debe que cuando aumentamos la presión del combustible la presión final en la cámara de mistura aumentara, necesitando más velocidad el aire para poder atomizar. También es explicado por la cantidad de masa la cual el aire tendrá que atomizar, si mayor es la presión mayor será el flujo que pasara por la boquilla del combustible, por lo cual el aire necesitara de mayor energía que brinda la presión estancamiento para desintegrar filamentos del combustible. Para el etanol trabajando desde los 250 kPa de presión de estancamiento del aire, hacia adelante se puede obtener valores a adecuados de diámetro de gota, si solo si se trabaja con presión de estancamiento de 300 kPa para el etanol. Si se desea operar a una mayor presión como la de 400 kPa para el etanol se deberá aumentar alrededor de 30 kPa más en el suministro de aire, siendo necesario 280 kPa para lograr mejores resultados en la atomización. Esta tendencia aumento se debe a lo explicado anteriormente. Para el propano trabajando desde presiones bajas de estancamiento del aire, hacia adelante se puede obtener valores adecuados de diámetro de gota, este comportamiento se repite operando con presiones de estancamiento de propano más altas, sin embargo, siempre es necesaria más presión del aire para lograr mejores resultados.

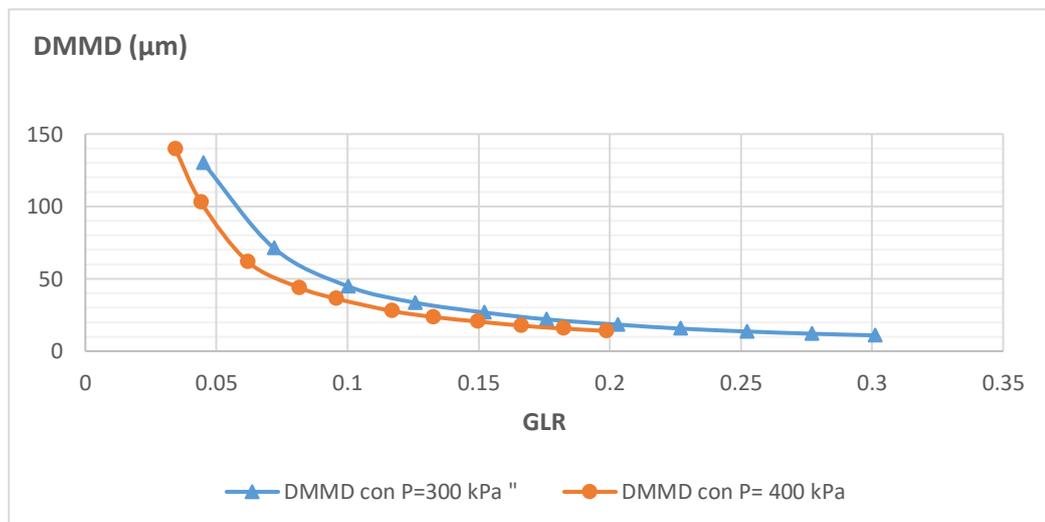


Figura N° 4.26 Influencia del GLR en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición de $P_l = cte$ (Etanol).

Las Fig. 4.26 y Fig.4.31 muestran los resultados las simulaciones realizadas en el inyector tipo Y, sobre la condición de frontera de presión de estancamiento de combustible constante. Para ambas graficas está claro el mismo comportamiento que los anteriores. A medida que el GLR aumenta los diámetros medios másicos tienden a disminuir. Este comportamiento demuestra que operar con presiones de combustible, ya sea de etanol o propano, más altas pero con un adecuado GLR conllevará a obtener mejores resultados en los diámetro. Sin embargo operar a presiones de estancamiento de combustible altas y conservar un GLR en el rango de 0,05 a 0,15, precisará de una mayor presión de estancamiento del aire, lo que tare por consecuencia un mayor trabajo por parte del compresor y bomba del combustible.

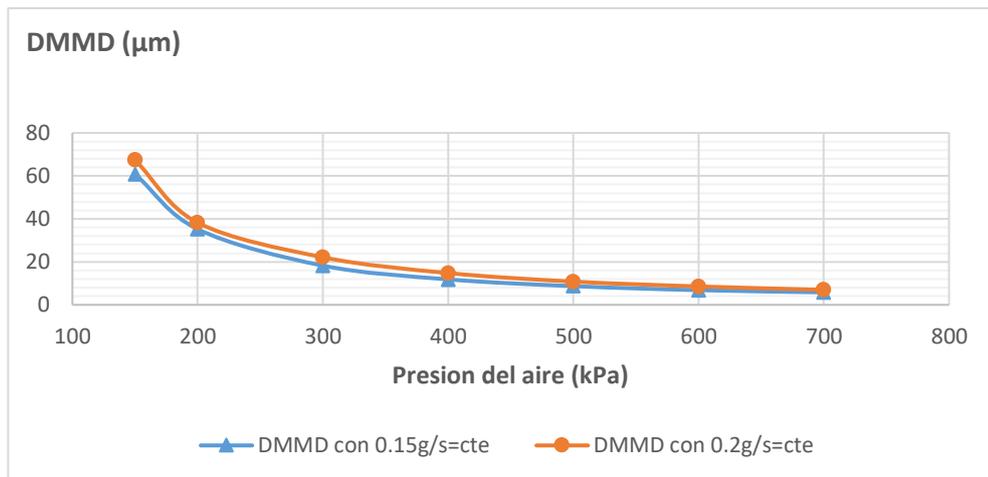


Figura N° 4.27 Influencia de la presión del aire en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición ml=cte (Propano).

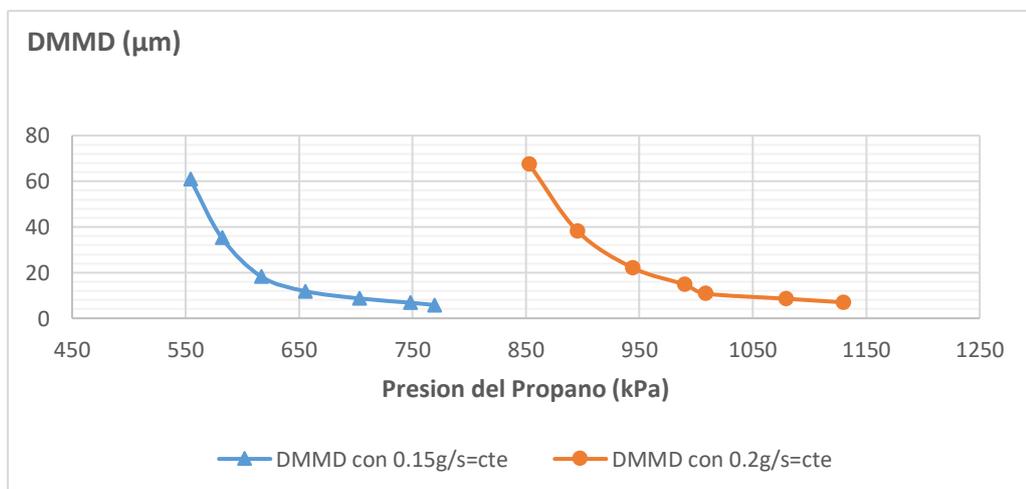


Figura N° 4.28 Influencia de la presión de Propano en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición de ml=cte (Propano).

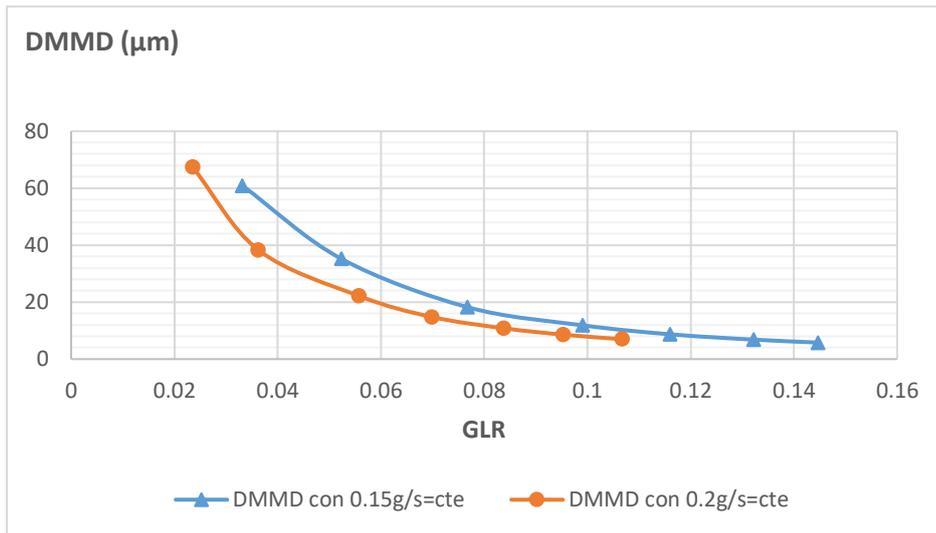


Figura N° 4.29 Influencia del GLR en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición de ml=cte (Propano).

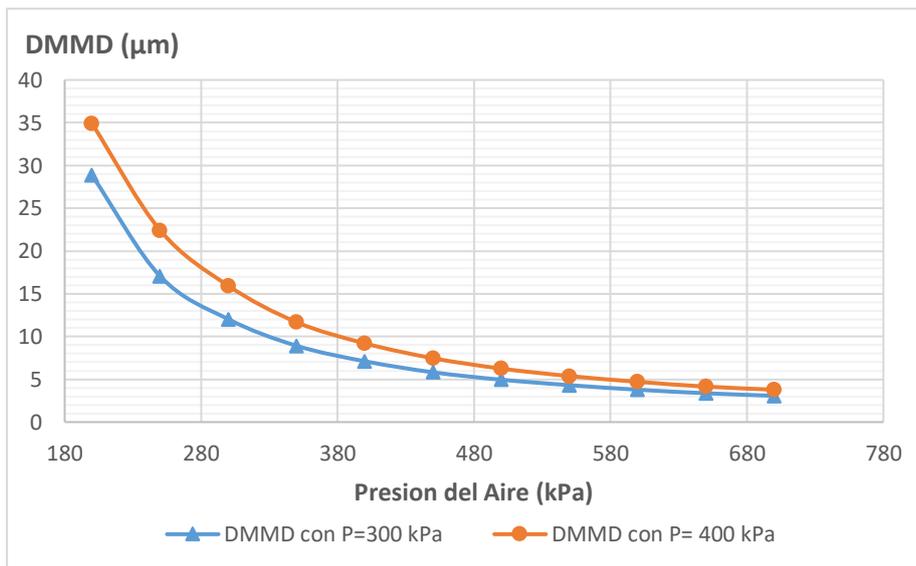


Figura N° 4.30 Influencia de la presión del aire en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición Pl=cte (Propano).

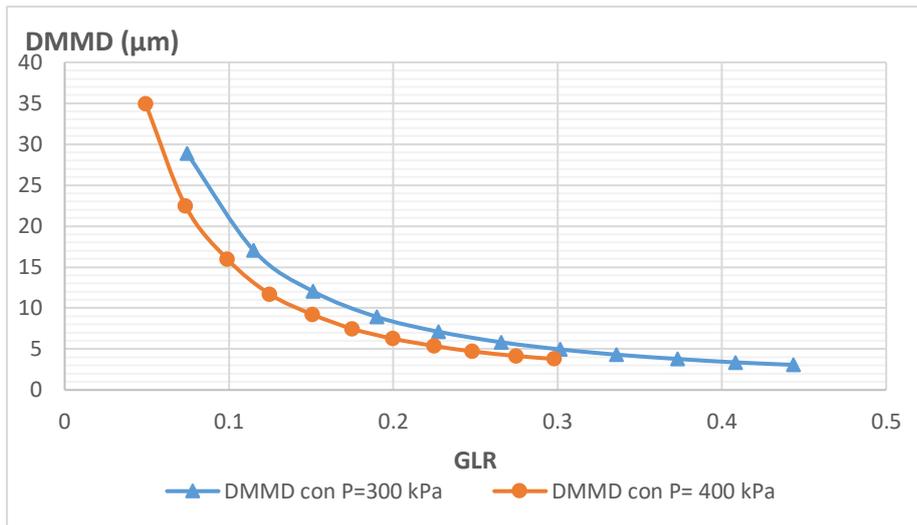


Figura N°4.31 Influencia del GLR en el diámetro representativo de gotas, sobre la condición de $PI=cte$ (Propano).

4.6. ANALISIS GRAFICO DE LA VELOCIDAD Y PRESION

Para apreciar en detalle lo que ocurre dentro del inyector se realizó la simulación con ambos fluidos donde se tuvo que mallar la primera zona, la cual formar parte la cámara de mistura y la boquilla de 52° de inclinación del combustible etanol.

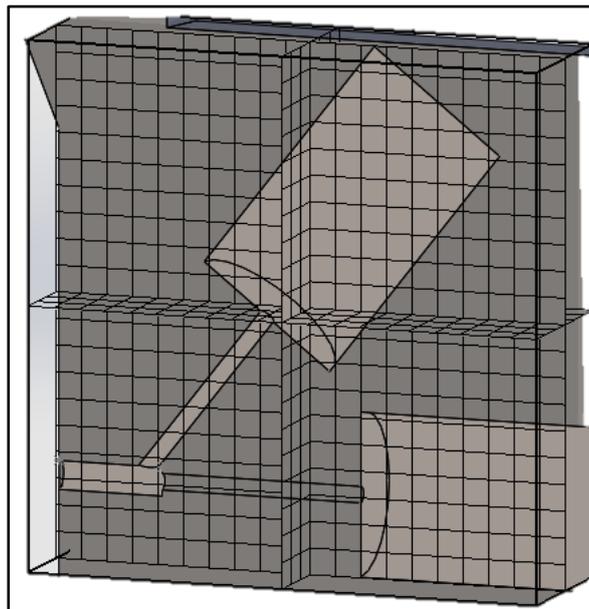


Figura N° 4.32 Global Mesh de la boquilla de combustible y la cámara de mistura.

Para este mallado se ingresaron las variables de contorno las cuales se aplicaron sobre los lids de salida de la cámara de mistura con 101.325 kPa (Presión ambiental) y el lid de 2 mm de diámetro de entrada al etanol, cambiando valores en una faja de 110 – 500 kPa.

En la primera simulación se realizaron 65 iteraciones por cada presión de estancamiento, de los cuales se hicieron uso de convergencia y progresos del 100%. Se ingresaron Surface Goals en el Lid de suministro de etanol para medir el flujo másico en kg/s de combustible, suministrado al inyector.

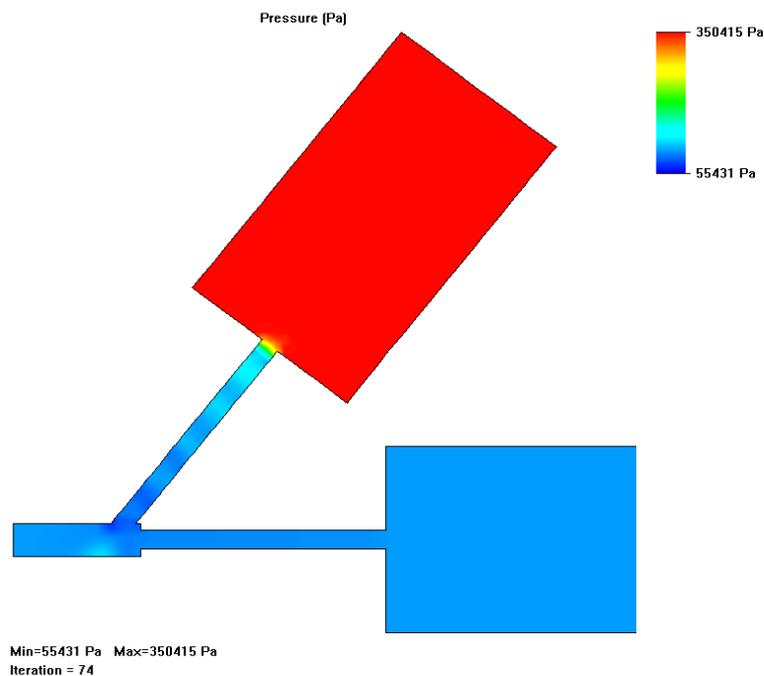


Figura N° 4.33 Vista lateral del campo de presión del etanol, a una presión de 350 kPa.

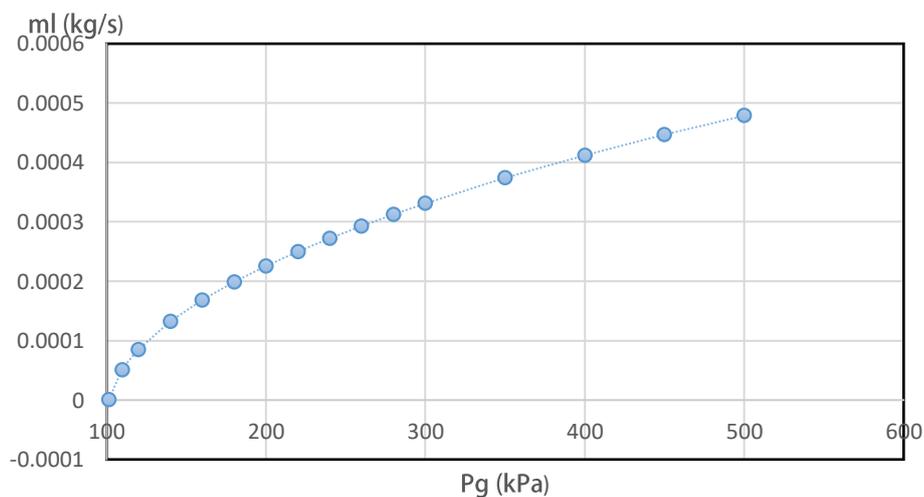


Figura N° 4.34 Flujo másico de etanol en función de la presión de estancamiento

La influencia de la presión de estancamiento del etanol sobre su flujo másico tiene un comportamiento cuasi-polinómico de grado 2 con un $R= 0.9872$, a la vez que es aumentada la presión aumente el flujo de masa, sin embargo cuando este decae a valores cercanos a la presión ambiental (101.325 kPa) se aprecia la caída con comportamiento polinómica más pronunciado desde la franja de 150 kPa a 100kPa. Dentro de la caracterización de la presión y velocidad se aplicaron 50 líneas de flujo para así notar el comportamiento de las variables a lo largo de la longitud.

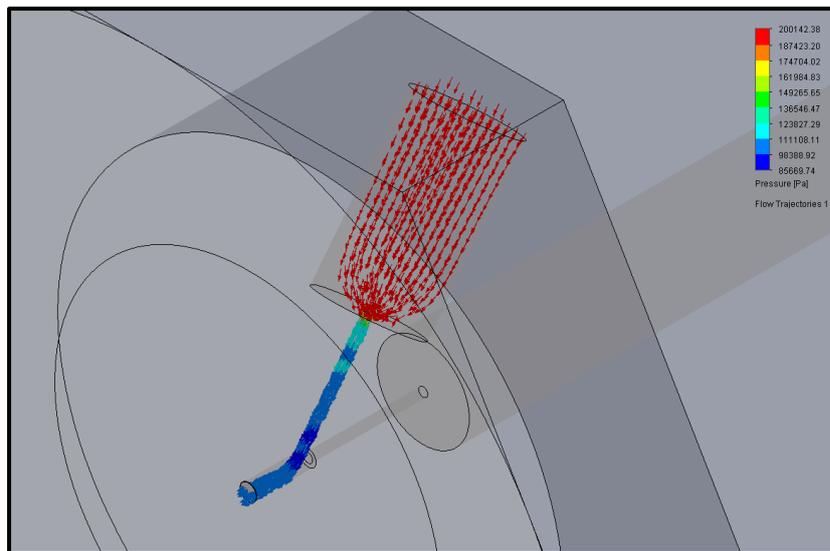


Figura N° 4.35 Vista isométrica del etanol a 200 kPa de presión de estancamiento.

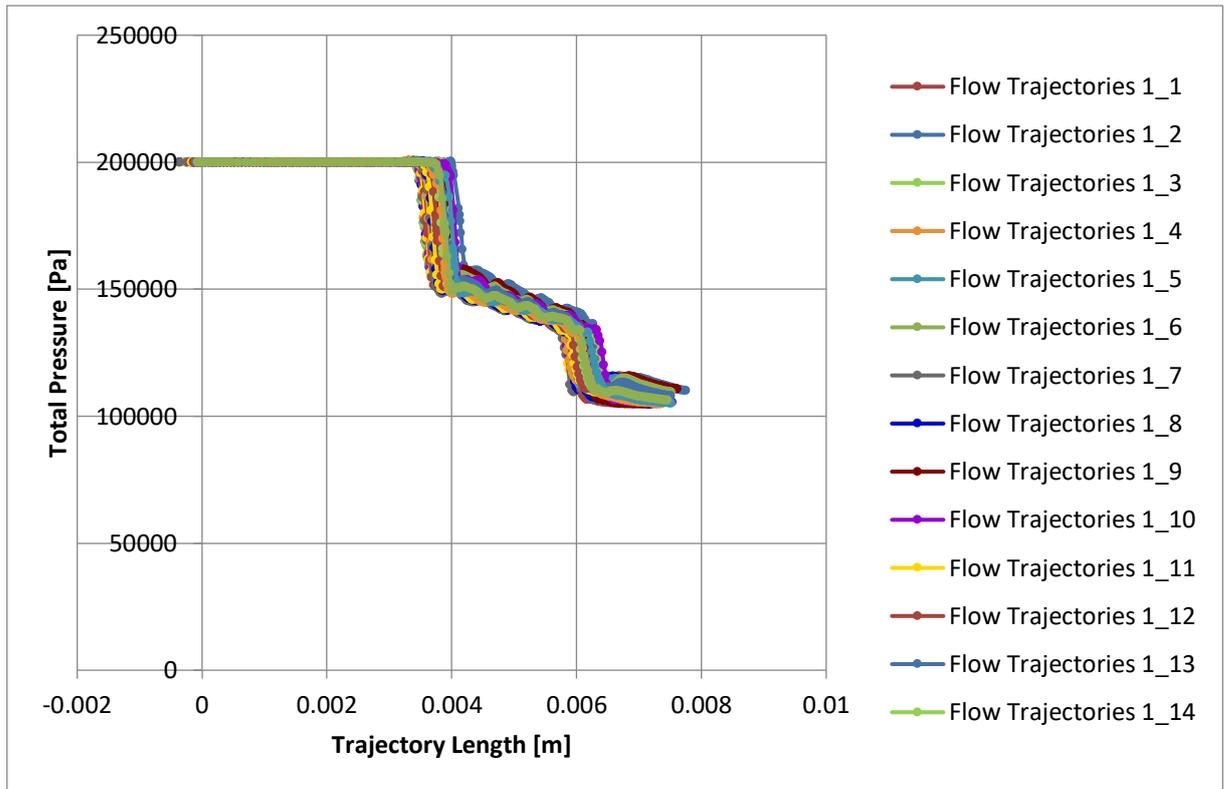


Figura N° 4.36 Comportamiento de la presión a lo largo de la longitud del inyector.

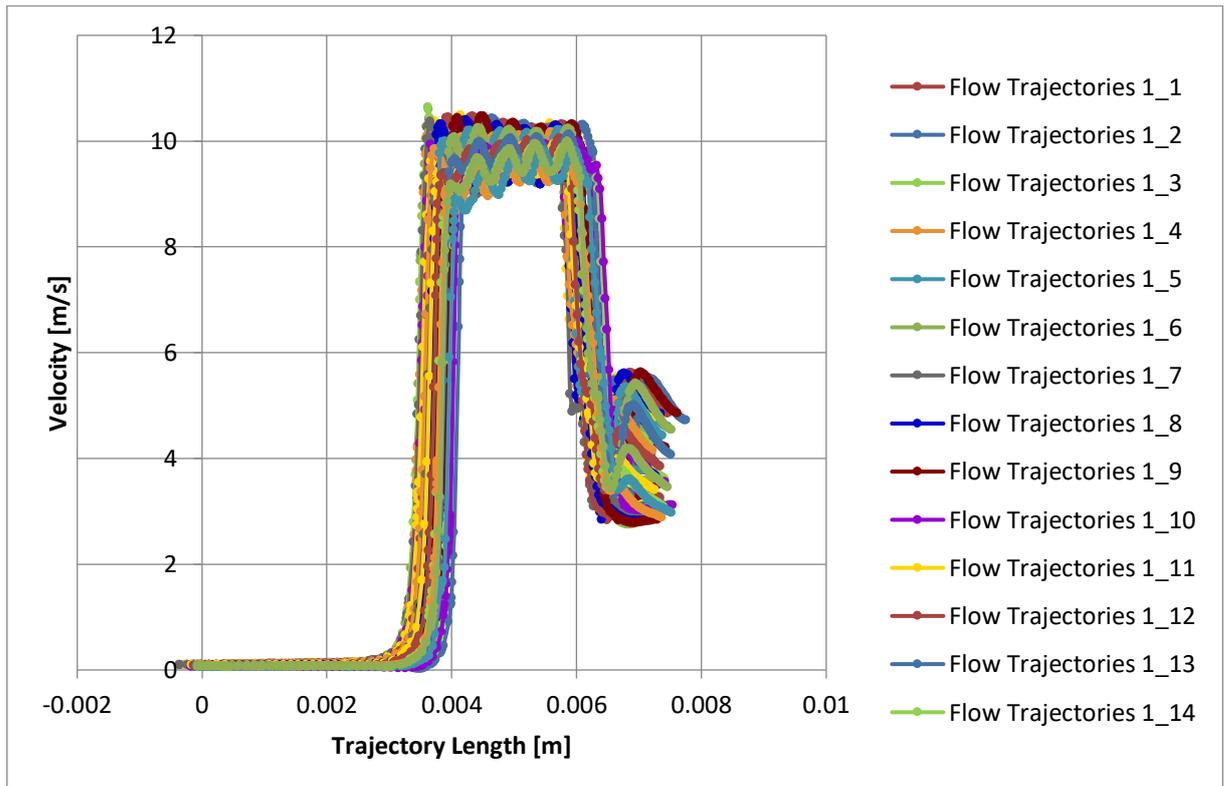


Figura N° 4.37 Comportamiento de la velocidad a lo largo de la longitud del inyector.

Se puede apreciar que cuando la presión entra en la boquilla de 0.2 mm la presión cae, subiendo paralelamente la velocidad desde el estancamiento hasta los 10 m/s. Seguidamente el flujo se expande para llegar a la cámara de mistura decayendo la presión gradualmente a la misma vez que la velocidad se mantiene casi constante. Cuando el flujo se desarrolla a lo largo de la cámara se observa cómo se estabiliza la presión y la velocidad.

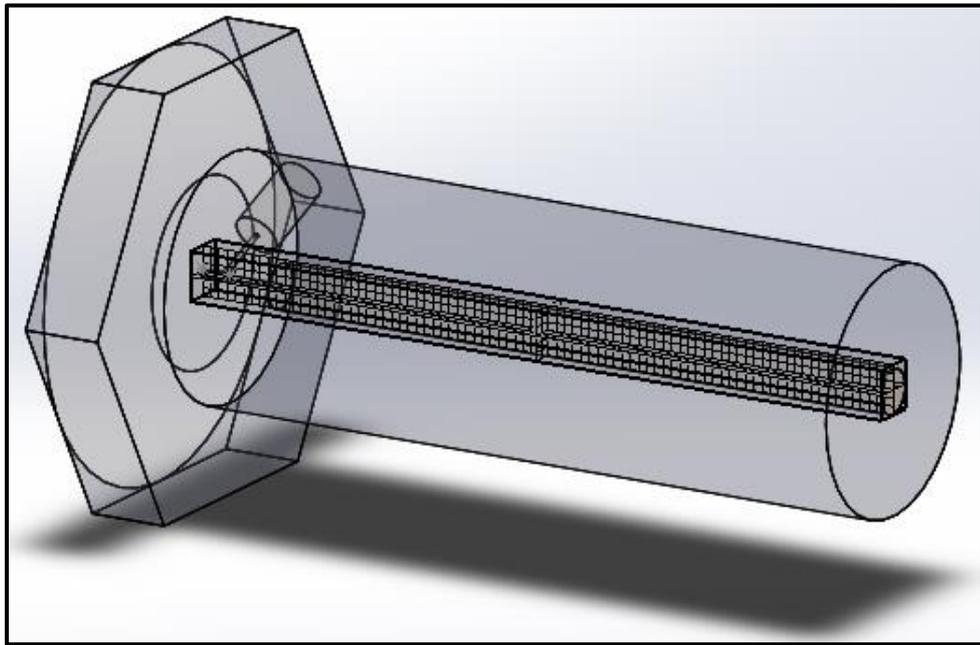


Figura N° 4.38 Global Mesh de la boquilla de aire y la cámara de mistura.

En la segunda simulación se realizó mallado a toda la boquilla de aire de 2/0,2 mm y a la cámara de mistura, donde se ingresaron las variables de contorno las cuales se aplicaron sobre los lids de salida de la cámara de mistura con 101.325 kPa (Presión ambiental) y sobre la capa 2 mm de diámetro para el ingreso de aire, actuando con valores en las franja de 110 – 650 kPa.

Para esta parte del estudio se realizaron 50 iteraciones por cada presión de estancamiento, de los cuales se hicieron uso de convergencia y progresos del 100%. Se ingresaron Surface Goals en el Lid de suministro de aire para medir el flujo másico en kg/s del gas, suministrado al inyector.

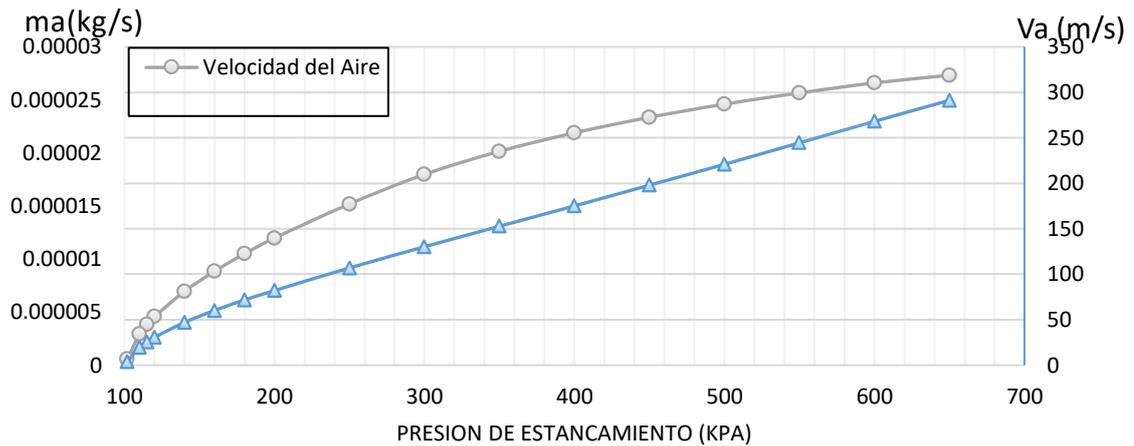


Figura N° 4.39 Flujo másico y velocidad del aire en función de la presión de inyección.

La influencia de la presión sobre flujo másico de aire es lineal, sin embargo la velocidad tomada en la salida de la boquilla de aire (entrada a la cámara de mistura), tiende a comportarse de manera sónica cada vez que la presión aumenta confirmando lo estudiado por (Baukal y Schwartz, 2001) .Cuando es aumentada la presión aumente el flujo de masa y la velocidad , sin embargo cuando este decae a valores cercanos a la presión ambiental (101.325 kPa) se aprecia la caída con comportamiento polinómica más pronunciado desde la franja de 120 kPa a 100kPa. Dentro de la caracterización de la presión y velocidad se aplicaron 50 líneas de flujo, de las cuales solo se muestran 14 en las gráficas, para así notar el comportamiento de las variables a lo largo de la longitud.

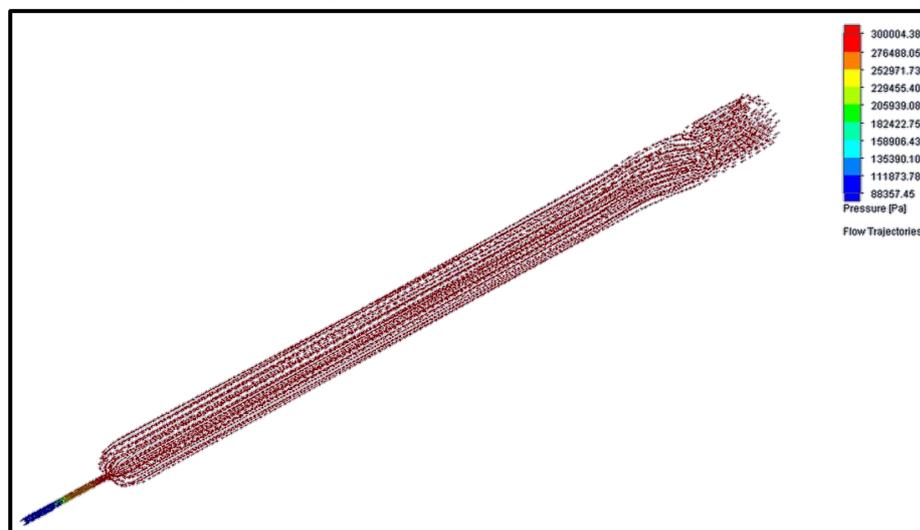


Figura N° 4.40 Vista isométrica del aire a 300 kPa de presión de inyección.

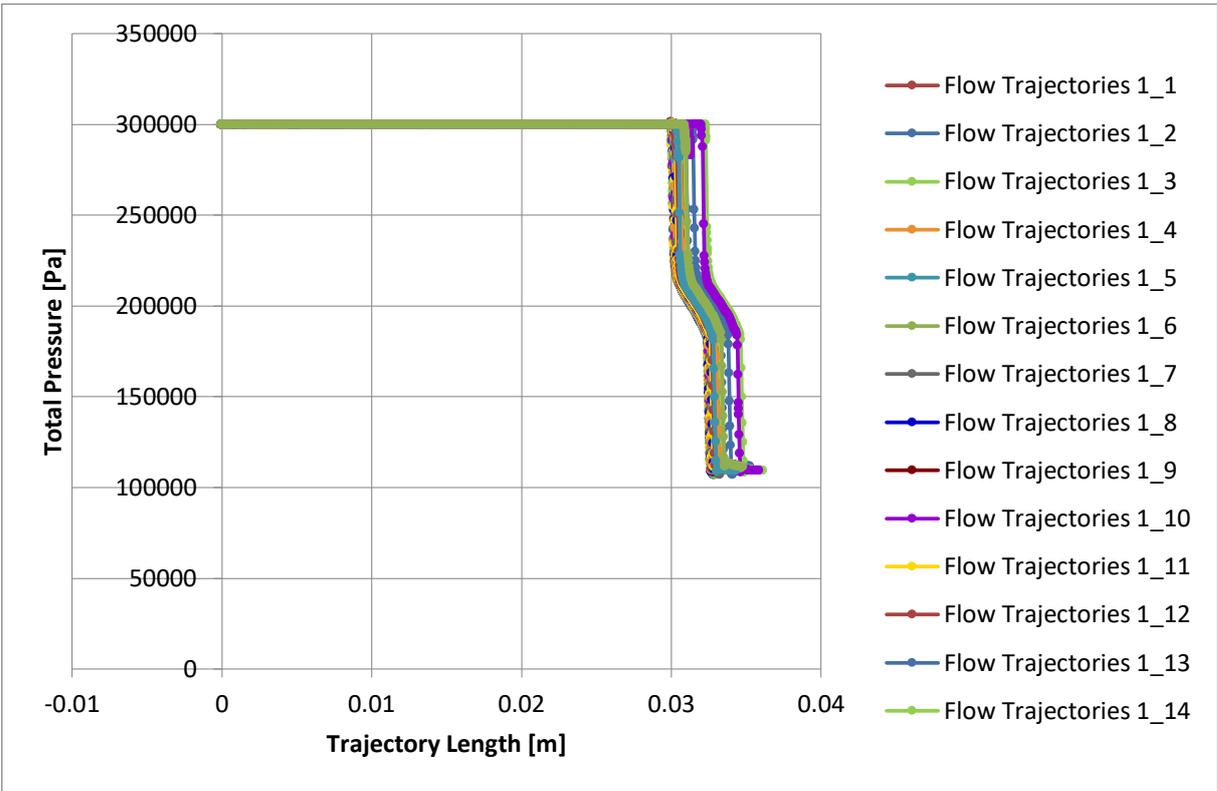


Figura N° 4.41 Comportamiento de la presión a lo largo de la longitud del inyector.

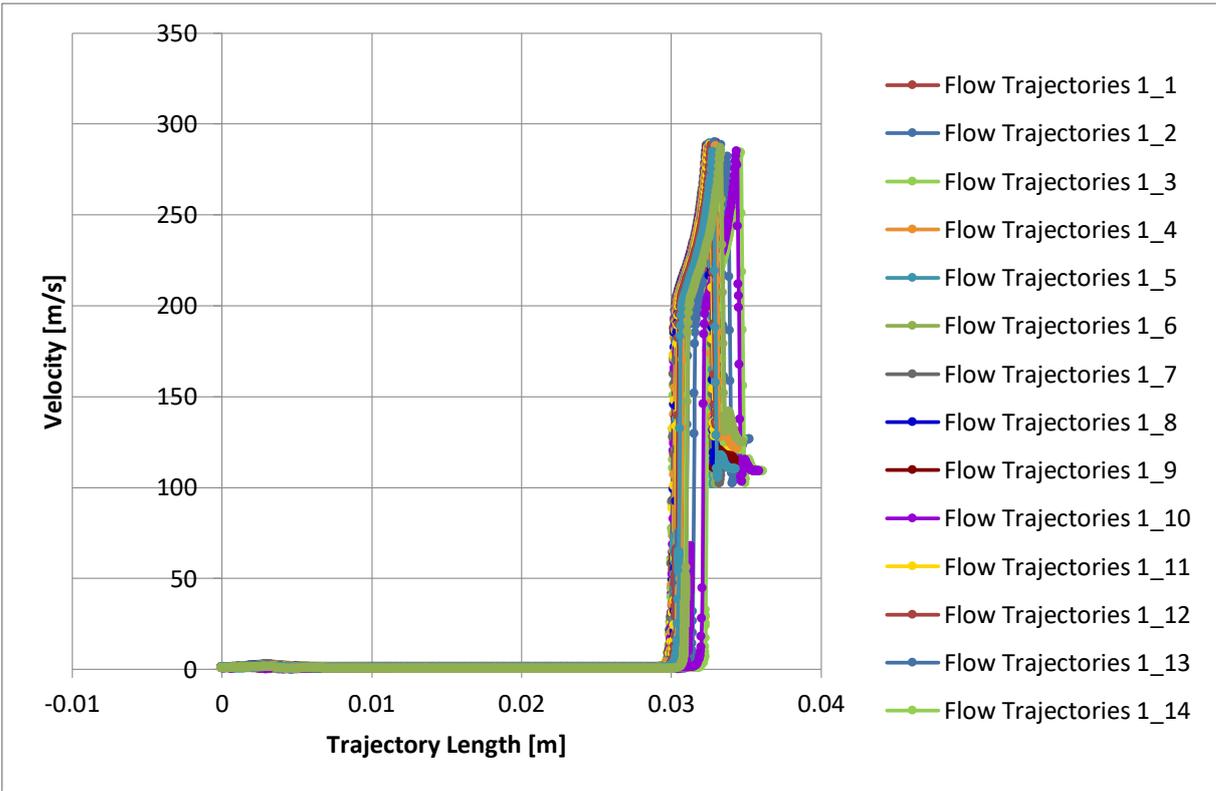


Figura N° 4.42 Comportamiento de la velocidad a lo largo de la longitud del inyector.

Cuando la presión entra en la boquilla de 0.2 mm la presión cae de 300 kPa a 220 kPa aumentando su energía cinética con su principales variables cuadrática, la velocidad, llegando 200 m/s. A continuación, el flujo se expande para llegar a la cámara de mistura decayendo la presión gradualmente hasta llegar a presiones alrededor de los 120 kPa y así la velocidad se estabiliza 125 m/s que la velocidad de salida de la cámara de mistura. Cabe recalcar que las mayores velocidades, las cuales están cerca del régimen sónicos, se encuentran cerca de la salida de la boquilla del conducto de 0,2 mm de aire. Dato que confirma las consideraciones tomadas en cálculos realizados en otras investigaciones.

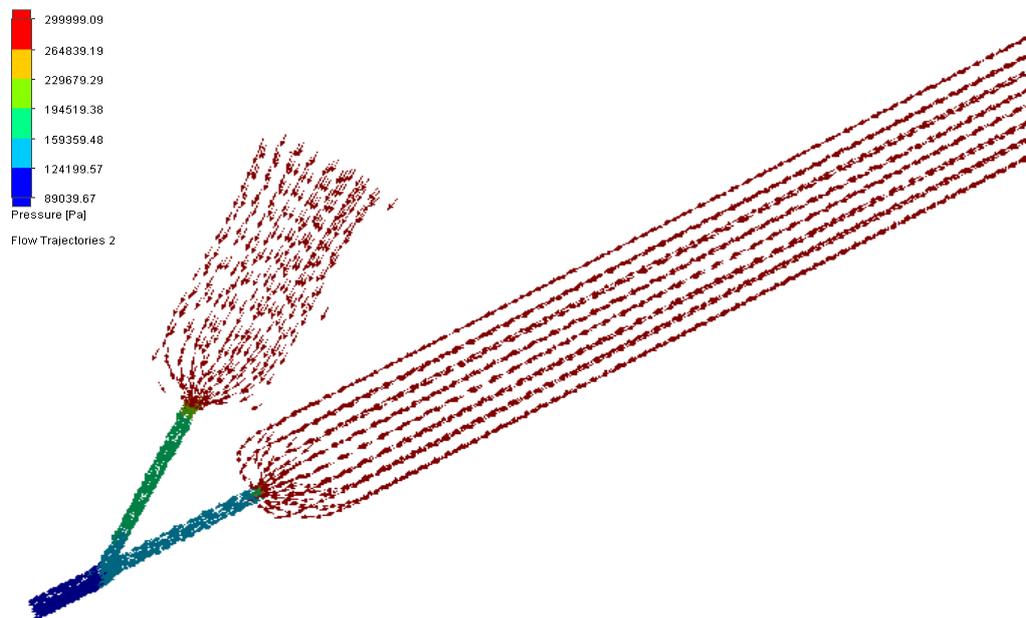


Figura N° 4.43 Vista isométrica del aire a 300 kPa y etanol a 280 kPa de presión de estancamiento.

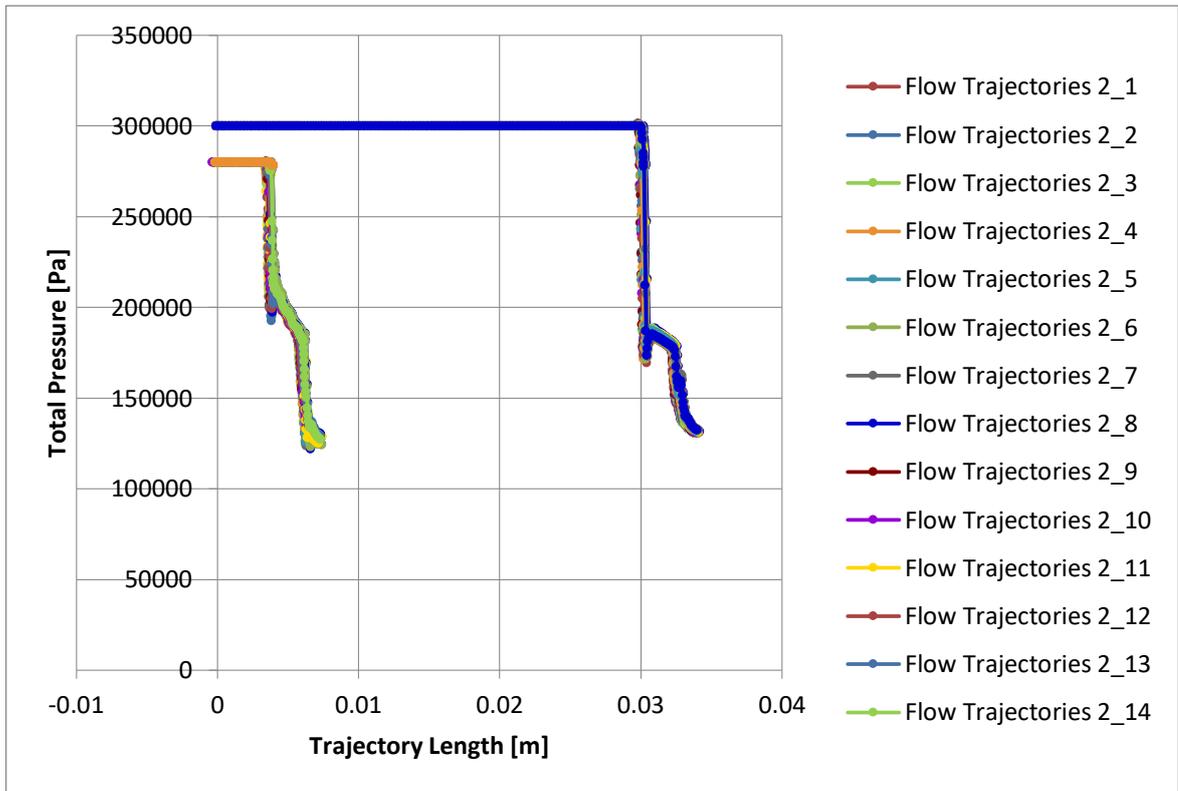


Figura N° 4.44 Comportamiento de la presión a lo largo de la longitud del inyector.

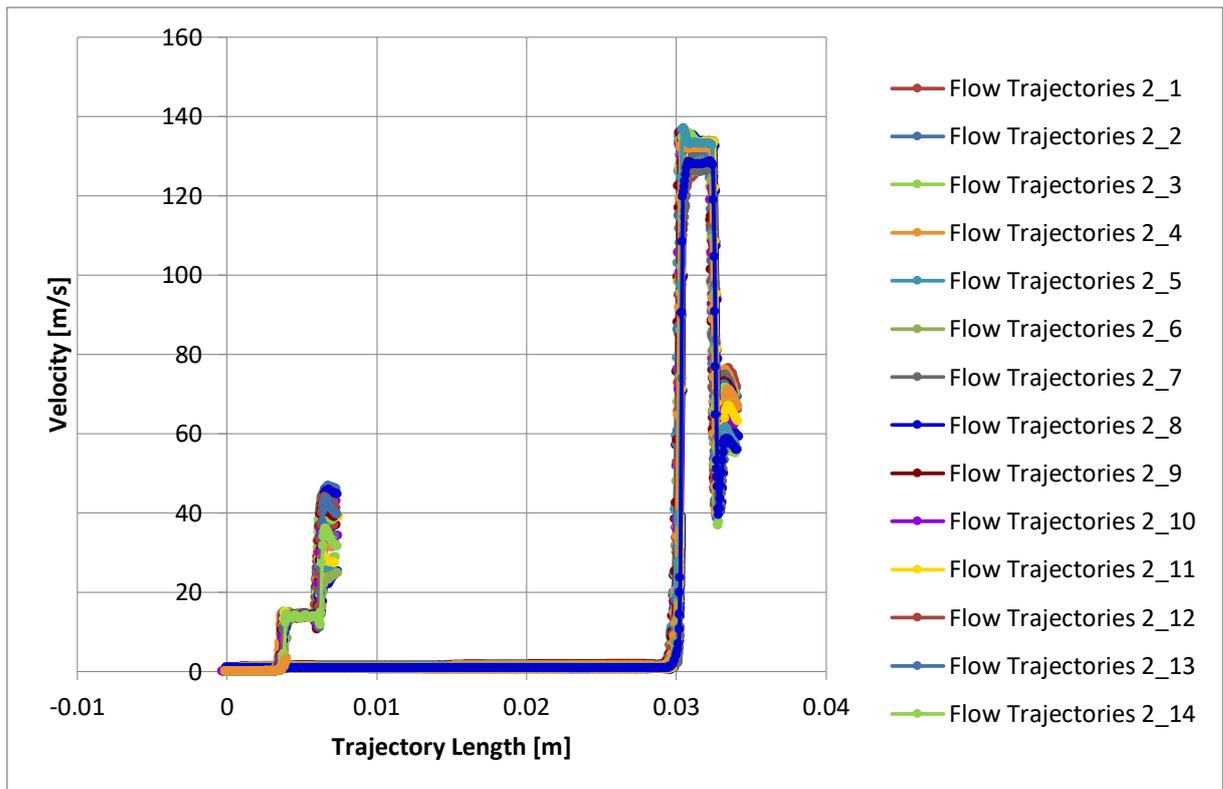


Figura N° 4.45 Comportamiento de la velocidad a lo largo de la longitud del inyector.

Finalmente se realizó la simulación de los dos fluidos (etanol y aire), el cual se puede apreciar desde la figura 12 a 14, donde los datos hallados son muy similares a las gráficas ya plasmadas, mejor dicho las que fueron estudiadas solo con un fluido. Sin embargo en la Figura 13 y 14 notamos como en la cámara de mezcla la presión prácticamente se estabilizó a un grupo de valores cercanos a 130 kPa. En la velocidad no se consigue el mismo comportamiento que en la presión, aquí la variable del fluido aumenta en grandes proporciones comparado con el caso en este se encuentre solo, este es ayudado por el aire a aumentar su cantidad de movimiento para así poder despegar los ligamentos formados por el cizallamiento que ocurre en la cámara de mezcla, disminuyendo a la vez la energía cinética del aire con valores proporcionales a 60 m/s.

CAPITULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se diseñó el inyector tipo *Y* de 5 kW térmicos. Para el cálculo de los parámetros se consideró, que el gas de atomización (aire) se encontraba en condiciones críticas y que el número de Mach es 1. De lo aplicado en la metodología se obtuvieron las medidas que caracterizan al inyector; por lo que el inyector fue diseñado para operar con 0.0001851 kg/s de combustible, con un ducto de combustible y de gas de atomización de 0,2 mm. Los datos a detalle se encuentran en la tabla n° 4.3, los mismos que fueron esbozados en el Software de diseño Solidworks 2016.
- Se determinó el campo de presión y velocidad de inyección que influye en la atomización del etanol y propano. En las pruebas, para conocer los rangos de presión y velocidad adecuados, se analizaron los flujos máscicos de combustible, presión de estancamiento del aire y combustible, velocidad del aire y GLR. Los resultados revelaron que el atomizador tiene una capacidad de suministro combustible bajo tasas de 0,15 a 0,48 g / s, utilizando una presión de inyección en el rango de 150 hasta 500 kPa absolutos para el etanol y para el propano un suministro de combustible bajo tasa de 0,14 a 1,41 g/s, utilizando el mismo rango de presión que el etanol.
- Fue determinado el diámetro de gota del spray generado por el proceso de inyección, por medio de la ecuación de Wigg la cual posee variables como Viscosidad cinemática del etanol (cSt), Flujo máscico de combustible (g/s), Flujo máscico del aire (g/s), Diámetro de la cámara de mistura (cm), Tensión superficial de combustible (dinas/cm), Densidad del aire (g/cm³) y Velocidad del aire de atomización (m/s). Estas variables influyen en el proceso de atomización. En esta investigación se mantuvieron constantes las presiones de estancamiento y flujo de combustible para lograr evaluar los cambios que genera en las variables de operación (GLR y flujos máscicos), y así obtener resultados de los diámetros de gota para las diferentes condiciones que se estudia, esta evaluación se encuentra en la sección 4.5.

5.2. RECOMENDACIONES

- Realizar el mismo estudio con un Software de simulación más avanzada que el Solidworks 2016, pero manteniendo el mismo método de análisis según el CFD, el cual ayudara a interactuar mejor con la geometría del inyector.
- Realizar un estudio grafico-descriptivo de las características del spray. Este proceso debería evaluar la dispersión, el ángulo, el patrón de dispersión y el proceso de desintegración de las gotas fuera del inyector.
- Realizar un estudio que tenga el propósito comparar dos hidrocarburos productos de alcoholes, para poder notar las similitudes en su proceso de atomización.
- Para el estudio realizado al propano se debe resaltar que para poder lograr una adecuada atomización no solo es necesario enfocarse en los parámetros de operación del inyector. En la práctica precisa de acondicionar las variables ambientales para que pueda mantenerse en estado líquido. Este proceso hace que el atomizar propano sea una tarea inviable.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

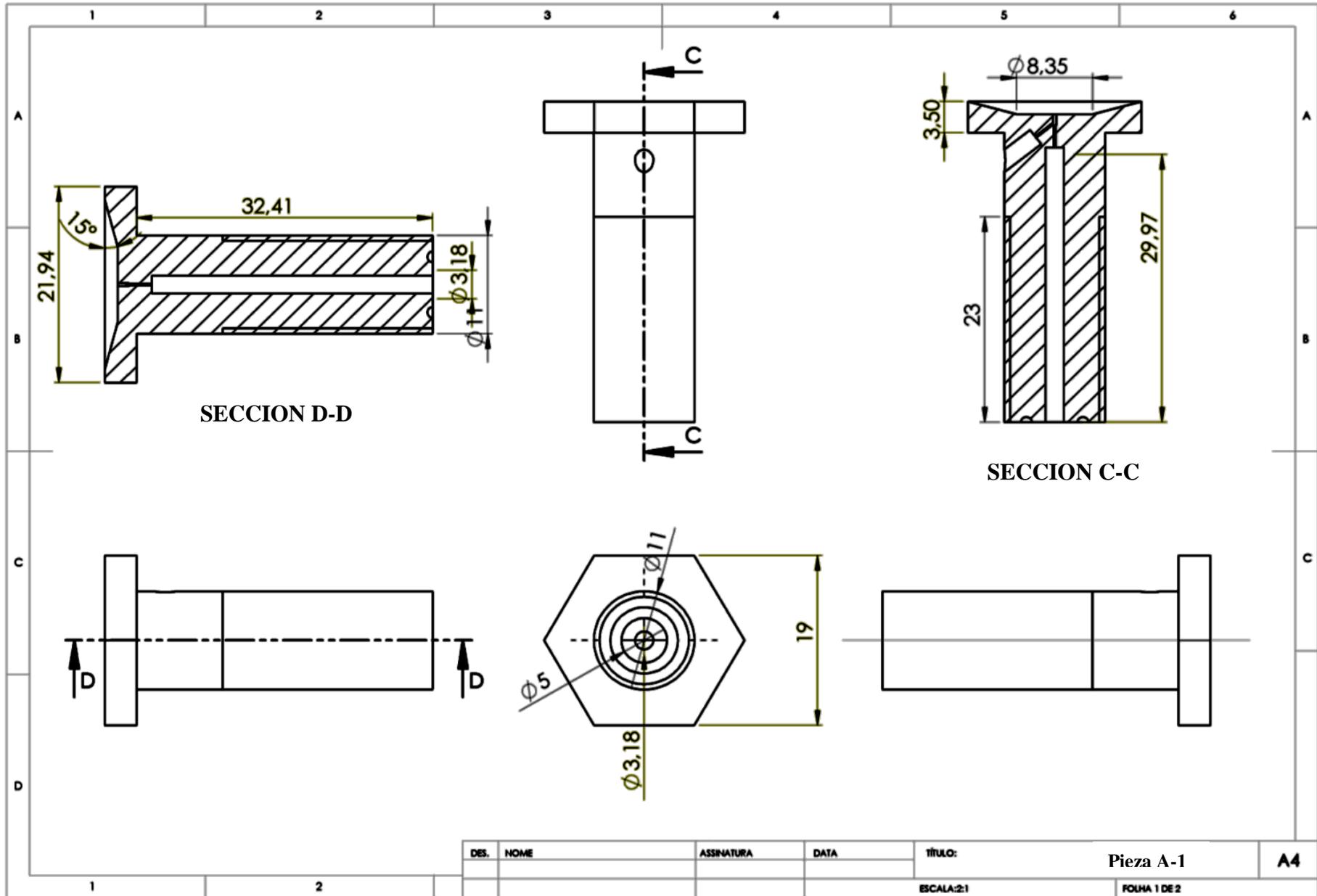
- BEÉR, J., & CHIGIER N. (1983). *Combustion Aerodynamics*. Malabar: Robert E. Krieger Publishing Company .
- BOURNAY, L.; CASANAVE, D.; DELFORT, B.; HILLION, G.; CHODORGE, J., 2005. A New Heterogeneous Process for Biodiesel Production: a Way to Improve the Quality and the Value of the Crude Glycerin Produced by Biodiesel Plants, *Catalysis Today*, n° 106, pp, 190-192.
- CAI, G., LI, C. y TIAN, H., 2016. Numerical and experimental analysis of heat transfer in injector plate of hydrogen peroxide hybrid rocket motor. *Acta Astronautica* [en línea], vol. 128, pp. 286-294. ISSN 00945765. DOI 10.1016/j.actaastro.2016.05.041. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.05.041>.
- CHIGIER, N. A., 1976. The Atomization and Burning of Liquid Fuel Sprays, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 2, pp. 97 – 114.
- CHUMPITAZ AYALA, G.R., 2016. *Estudo da atomização e caracterização de injetores utilizando óleo pirolítico de pneu usado puro e em misturas com diesel*. S.l.: Universidade Federal de Itajubá.
- DEMIRBAS, A., 2007. Importance of biodiesel as transportation fuel, *Energy Policy*, Vol. 35, pp. 4661–4670.
- FERZIGER, J. y PERÍC, M., 2002. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Third. USA: s.n. ISBN 3540420746.
- GIAMPIETRO, M. AND MAYUMI, K., 2009 *The Biofuel Delusion: The fallacy of large scale agro-biofuels production*. Earthscan Research Edition, London.
- GONÇALVES, B. R. L.; PEREZ, L.; ÂNGELO, A. C. D., 2009. Glicerol: Uma Inovadora Fonte de Energia Proveniente da Produção de Biodiesel, 2nd International Workshop Advances in Cleaner Production; Key Elements for a Sustainable World: Energy, Water and Climate Change, São Paulo – Brasil – 20 – 22 Maio.
- JIANG, L., AGRAWAL, A.K. y TAYLOR, R.P., 2014. Clean combustion of different liquid fuels using a novel injector. *Experimental Thermal and Fluid Science* [en línea], vol. 57, pp. 275-284. ISSN 08941777. DOI 10.1016/j.expthermflusci.2014.05.002. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.05.002>.

- KEGL, B. y HRIBERNIK, A., 2006. Experimental analysis of injection characteristics using biodiesel fuel. *Energy and Fuels*, vol. 20, no. 5, pp. 2239-2248. ISSN 08870624. DOI 10.1021/ef060285m.
- KHALID, A., SAPIT, A., ANUAR, M.N., HIM, R., MANSHOOR, B., ZAMAN, I. y NGALI, Z., 2014. Analysis of Fuel Injection Parameter on Biodiesel and Diesel Spray Characteristics Using Common Rail System. *Advanced Materials Research* [en línea], vol. 974, pp. 362-366. ISSN 1662-8985. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.974.362. Disponible en: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84904108284&georpartnerID=tZOtx3y1>.
- LACAVALA, P.T., 2004. ATOMIZADOR TIPO «Y-JET» – PROJETO, CARACTERÍSTICAS DO SPRAY E COMBUSTÃO. Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering.
- LLOPIS, GÁLVEZ, RUBIO, LÓPEZ., Física: curso teórico-práctico de fundamentos físicos de la ingeniería. p. 456, en Google Libros
- MA, F.; HANNA, M.A., 1999. Biodiesel Production: a Review, *Bioresource Technology*, Vol. 70, pp. 1 - 15.
- MÉNDEZ PAZOS, A. y SÁEZ MARTÍN, A., 2007. Desarrollo sostenible y economía : una mirada hacia el futuro. *Macroeconomía Aplicada*, pp. 1-17.
- MULLINGER, P., & CHIGIER, N. (1974). The design and performance of internal mixing multijet twin fluid atomizers. *Journal of the institute of fuel*, 47, pp. 251 - 261.
- QUISPE GONZALES, C.A., 2013. *Investigação de injetores tipo Y e efervescentes para a atomização da mistura de glicerina e etanol* [en línea]. S.l.:UNESP..Disponible.en:http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/106397/gonzales_caq_dr_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- QUISPE, C.A.G., TORRES, W.E.A., COSTA, F.S., JR, J.A.C., GUARATINGUETÁ, F.D.E. De PAULISTA, U.E., FÍSICAS, F.D.C., NACIONAL, U. y SAN, M. De, 2013. Análisis de flujo y su influencia en el diámetro medio de las gotas para inyectores de mistura interna tipo Y. , vol. 121501652, no. 2012, pp. 1-9.
- RAPIN, PIERRE J.; JACQUARD, J.; JACQUARD, PATRICK., 1997. Instalaciones frigoríficas.

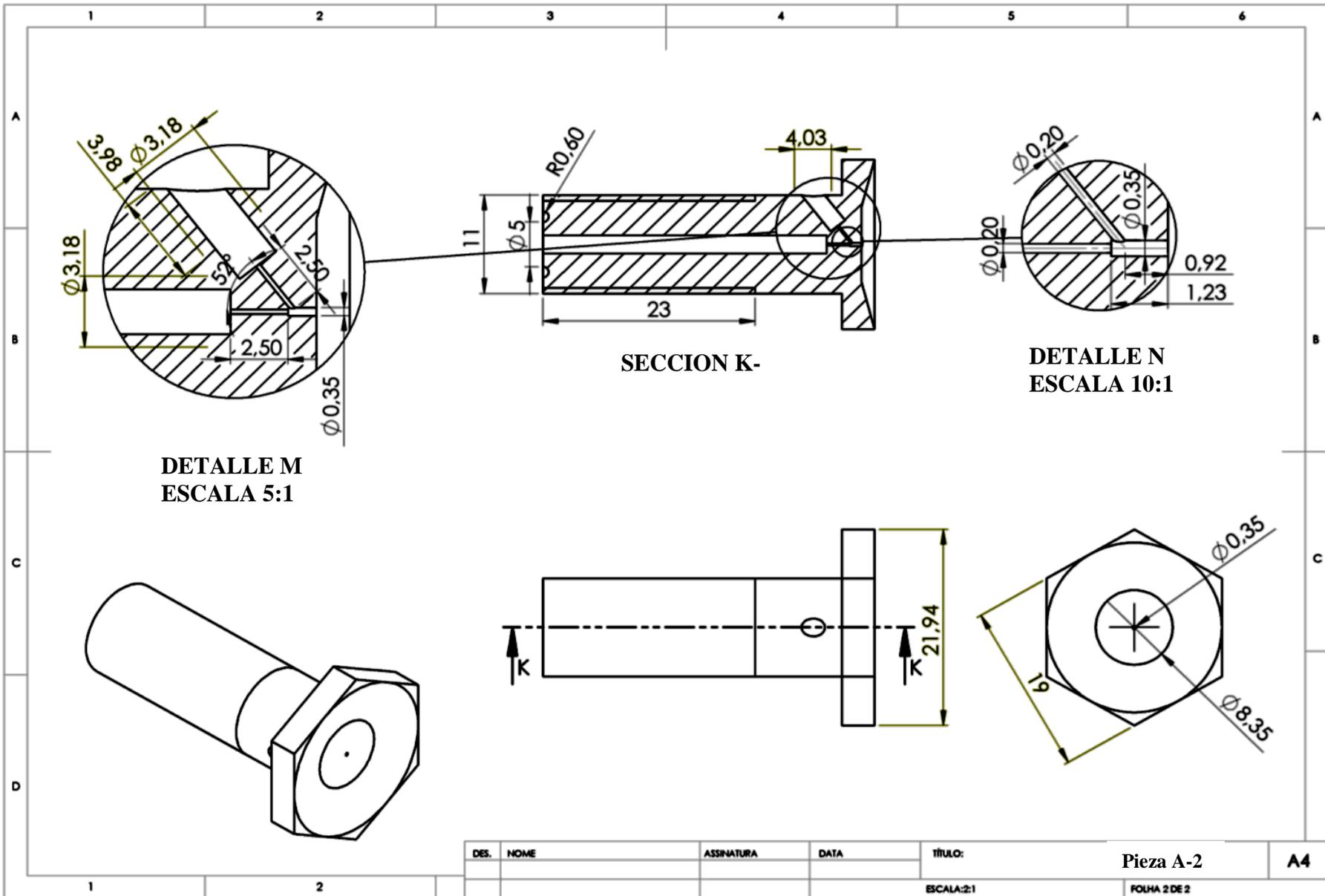
- SABOURIN-PROVOST, G.; HALLENBECK, P. C., 2009. High yield conversion of a crude glycerol fraction from biodiesel production to hydrogen by photofermentation, *Bioresource Technology*, vol 100, pp. 3513–3517
- SOLIDWORKS, F.S., 2012. Solidworks Flow Simulation 2012 Technical Reference. S.l.: s.n.
- SONG, S., & LEE, S. (1996). Study of atomization mechanism of gas/liquid mixtures flowing through YJet atomizers. *Atomization and Sprays*, 6, pp. 193 - 209.
- SUH, H.K. y LEE, C.S., 2008. Experimental and numerical analysis of diesel fuel atomization characteristics of a piezo injection system. *Oil and Gas Science and Technology*, vol. 63, no. 2, pp. 239-250. ISSN 12944475. DOI 10.2516/ogst:2007074.
- VOLMAJER, M. y KEGL, B., 2001. Experimental and numerical analysis of fuel flow in the diesel engine injection nozzle., no. 1, pp. 9-16.
- WIGG, L.D., 1964, “Drop Size Prediction for Twin Atomizers”, *Journal of the Institute of Fuel*, vol.37, n. 286, pp. 500- 505.

ANEXOS

ANEXO N° 1 Boquilla del inyector tipo Y de 5 kW, Chumpitaz Ayala (2016)



DES.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO:	
				Pieza A-1	A4
				ESCALA:2:1	FOLHA 1 DE 2



ANEXO N° 2 Resultados de simulación del flujo másico y velocidad de inyección del aire

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	1.211705838	1.211705819	1.211705651	1.211705847	100	Yes	1.96224E-07	1.06514E-05
PG Velocity 1	[m/s]	6.650140578	6.687091997	6.650140578	6.752809423	100	Yes	0.102668845	0.381560436
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	3.34339E-07	3.35452E-07	3.34339E-07	3.37545E-07	100	Yes	3.20641E-09	1.93693E-08
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	2.7592E-07	2.76839E-07	2.7592E-07	2.78566E-07	100	Yes	2.64617E-09	1.59849E-08
Presion del aire = 102 kPa									
Iterations []: 47									
Analysis interval: 24									
Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	1.306527713	1.306526908	1.30652118	1.306528178	100	Yes	6.99781E-06	0.000264922
PG Velocity 1	[m/s]	34.20827771	34.11646326	33.31677341	34.42310649	100	Yes	1.106333082	1.977031561
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	1.68213E-06	1.67267E-06	1.59913E-06	1.68776E-06	100	Yes	8.86289E-08	9.77339E-08
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	1.28725E-06	1.28001E-06	1.22374E-06	1.29156E-06	100	Yes	6.78222E-08	7.47941E-08
Presion del aire = 110 kPa									
Iterations []: 48									
Analysis interval: 24									
Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	1.365792367	1.365791244	1.365781422	1.36579343	100	Yes	1.20077E-05	0.000449761
PG Velocity 1	[m/s]	44.93486895	44.58933698	43.62007892	45.06925053	100	Yes	1.449171612	2.593449083
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	2.20494E-06	2.18914E-06	2.09557E-06	2.20519E-06	100	Yes	1.09625E-07	1.26992E-07
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	1.61397E-06	1.6024E-06	1.53391E-06	1.61416E-06	100	Yes	8.02426E-08	9.29587E-08
Presion del aire = 115 kPa									
Iterations []: 49									
Analysis interval: 24									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	1.425057878	1.425056161	1.42504357	1.425058882	100	Yes	1.5312E-05	0.000858118
PG Velocity 1	[m/s]	53.79928502	53.27855838	51.97588579	53.93006309	100	Yes	1.954177307	3.106558247
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	2.64967E-06	2.62511E-06	2.50147E-06	2.64967E-06	100	Yes	1.48203E-07	1.51291E-07
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	1.8587E-06	1.84147E-06	1.75474E-06	1.8587E-06	100	Yes	1.0396E-07	1.06159E-07
Presion del aire =		120 kPa							
Iterations []: 49									
Analysis interval: 24									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	1.662122099	1.662128174	1.662122099	1.662134792	100	Yes	1.26936E-05	0.005504673
PG Velocity 1	[m/s]	81.75117661	81.06857778	79.75960595	81.77252224	100	Yes	2.012916287	4.733946174
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	4.06708E-06	4.02568E-06	3.86944E-06	4.06708E-06	100	Yes	1.97646E-07	2.26777E-07
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	2.44542E-06	2.42053E-06	2.32658E-06	2.44542E-06	100	Yes	1.18835E-07	1.36543E-07
Presion del aire =		140 kPa							
Iterations []: 50									
Analysis interval: 24									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	1.899191135	1.899209108	1.899191135	1.899227625	100	Yes	3.64903E-05	0.019651452
PG Velocity 1	[m/s]	104.0545344	103.1705818	102.3261933	104.0545344	100	Yes	1.728341149	6.034269042
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	5.21991E-06	5.15506E-06	4.96412E-06	5.21991E-06	100	Yes	2.55796E-07	2.87951E-07
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	2.74626E-06	2.71216E-06	2.61176E-06	2.74626E-06	100	Yes	1.34503E-07	1.51309E-07
Presion del aire =		160 kPa							
Iterations []: 50									
Analysis interval: 24									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	2.136279111	2.136282065	2.136237703	2.136296775	100	Yes	5.90715E-05	0.031894045
PG Velocity 1	[m/s]	123.2135716	122.4596916	120.9311605	123.2135716	100	Yes	2.282411111	7.185983381
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	6.21546E-06	6.14502E-06	5.93958E-06	6.21546E-06	100	Yes	2.75879E-07	3.35593E-07
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	2.90669E-06	2.87376E-06	2.77769E-06	2.90669E-06	100	Yes	1.29008E-07	1.57025E-07
Presion del aire = 180 kPa									
Iterations []: 50									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	2.373372723	2.373370682	2.37329195	2.373392092	100	Yes	0.000100142	0.046033257
PG Velocity 1	[m/s]	139.8373949	139.6861348	138.7359834	141.3240791	100	Yes	2.588095679	8.267813959
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	7.07801E-06	7.03101E-06	6.73696E-06	7.08941E-06	100	Yes	3.52448E-07	3.83965E-07
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	2.97907E-06	2.95929E-06	2.83557E-06	2.98387E-06	100	Yes	1.48304E-07	1.60871E-07
Presion del aire = 200 kPa									
Iterations []: 49									
Analysis interval: 24									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	2.966125422	2.966107185	2.96602146	2.96613592	100	Yes	0.00011446	0.081382286
PG Velocity 1	[m/s]	178.5152317	177.2209992	171.1781529	179.3521485	100	Yes	8.173995585	10.54446811
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	9.28582E-06	9.15961E-06	8.7996E-06	9.28582E-06	100	Yes	4.86217E-07	5.05479E-07
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	3.12665E-06	3.08418E-06	2.96301E-06	3.12665E-06	100	Yes	1.63644E-07	2.31362E-07
Presion del aire = 250 kPa									
Iterations []: 52									
Analysis interval: 24									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	3.558910712	3.558862081	3.558673479	3.55891445	100	Yes	0.000240972	0.116734024
PG Velocity 1	[m/s]	212.241517	209.7464284	201.3180291	212.241517	100	Yes	10.92348796	12.47250377
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	1.13005E-05	1.11584E-05	1.07468E-05	1.13005E-05	100	Yes	5.53756E-07	6.60579E-07
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	3.17086E-06	3.13101E-06	3.01557E-06	3.17086E-06	100	Yes	1.55294E-07	3.81156E-07
Presion del aire = 300 kPa									
Iterations []: 52									
Analysis interval: 24									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	4.151729239	4.15158154	4.150931648	4.151746101	100	Yes	0.000814453	0.152089528
PG Velocity 1	[m/s]	238.7498197	235.1182036	225.7680767	238.7498197	100	Yes	12.98174305	14.07821699
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	1.32822E-05	1.30912E-05	1.2574E-05	1.32822E-05	100	Yes	7.08153E-07	1.04902E-06
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	3.19449E-06	3.14858E-06	3.02426E-06	3.19449E-06	100	Yes	1.70226E-07	5.75874E-07
Presion del aire = 350 kPa									
Iterations []: 51									
Analysis interval: 24									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	4.744517446	4.74440277	4.744162611	4.744517446	100	Yes	0.000354836	0.187440998
PG Velocity 1	[m/s]	259.5268162	255.4337752	244.4576682	259.5268162	100	Yes	15.06914806	15.34912832
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	1.5247E-05	1.50053E-05	1.42987E-05	1.5247E-05	100	Yes	9.48245E-07	1.46702E-06
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	3.20866E-06	3.15787E-06	3.00925E-06	3.20866E-06	100	Yes	1.99408E-07	7.75537E-07
Presion del aire = 400 kPa									
Iterations []: 50									
Analysis interval: 24									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	5.337339133	5.337271584	5.336647527	5.337375851	100	Yes	0.000728324	0.222798444
PG Velocity 1	[m/s]	276.8194067	272.5106952	261.6554833	277.2540243	100	Yes	15.59854099	16.43392448
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	1.72481E-05	1.69639E-05	1.61405E-05	1.72481E-05	100	Yes	1.10763E-06	1.76842E-06
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	3.2265E-06	3.17329E-06	3.0188E-06	3.2265E-06	100	Yes	2.07698E-07	9.33179E-07
Presion del aire = 450 kPa									
Iterations []: 50									
Analysis interval: 24									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	5.930152644	5.930034827	5.929128731	5.930179437	100	Yes	0.001050706	0.258152242
PG Velocity 1	[m/s]	290.3405438	286.997599	274.1813018	290.8577544	100	Yes	16.67645259	17.25509307
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	1.9253E-05	1.89288E-05	1.79721E-05	1.9253E-05	100	Yes	1.28088E-06	2.17674E-06
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	3.24141E-06	3.18677E-06	3.02455E-06	3.24141E-06	100	Yes	2.16855E-07	1.13473E-06
Presion del aire = 500 kPa									
Iterations []: 50									
Analysis interval: 24									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	6.522927074	6.522829698	6.522215884	6.522942346	100	Yes	0.000726462	0.293503638
PG Velocity 1	[m/s]	302.0860911	299.3289297	285.3217405	303.0017704	100	Yes	17.68002981	17.98820754
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	2.12792E-05	2.09533E-05	2.00487E-05	2.12792E-05	100	Yes	1.23047E-06	2.69453E-06
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	3.25685E-06	3.20684E-06	3.06579E-06	3.25685E-06	100	Yes	1.91052E-07	1.38375E-06
Presion del aire = 550 kPa									
Iterations []: 51									
Analysis interval: 24									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	7.115763162	7.115615454	7.11486893	7.115764943	100	Yes	0.000896013	0.328858419
PG Velocity 1	[m/s]	312.8667295	310.3613384	296.5306689	314.9186416	100	Yes	18.38797264	18.70690969
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	2.32639E-05	2.29767E-05	2.21597E-05	2.32639E-05	100	Yes	1.10425E-06	3.40622E-06
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	3.26389E-06	3.22372E-06	3.10802E-06	3.26389E-06	100	Yes	1.55873E-07	1.71311E-06
Presion del aire =	600 kPa								
Iterations []: 52									
Analysis interval: 24									

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Av Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	7.708821128	7.708549352	7.707213849	7.708821128	100	Yes	0.001607279	0.364227322
PG Velocity 1	[m/s]	321.3972989	318.6865393	303.6549946	322.7592726	100	Yes	19.10427793	19.18158599
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	2.52803E-05	2.49593E-05	2.40535E-05	2.52803E-05	100	Yes	1.22683E-06	5.41035E-06
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	3.27389E-06	3.23283E-06	3.1158E-06	3.27389E-06	100	Yes	1.58083E-07	2.55823E-06
Presion del aire =	650 kPa								
Iterations []: 52									
Analysis interval: 24									