



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MEZCLA
POR DIFUSIÓN EN UN ARREGLO DE CHORROS
4-LUG-BOLT**

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A

Hernández González Julio César

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Eliseo Martínez Espinosa



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Lucia González Castañeda y Vicente Hernández Zugarazo, por brindarme su apoyo incondicional y todas las herramientas para poder completar mis estudios y por estar a mi lado en todo momento a lo largo de mi vida.

A mi director de tesis, Dr. Eliseo Martínez Espinosa por su paciencia y compromiso que me permitió realizar este proyecto.

A mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme el honor de formar parte de su comunidad y ofrecerme las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional. Y en especial agradecimiento al Instituto de Ingeniería por brindarme la oportunidad de desarrollar el presente proyecto y proporcionándome todas las herramientas necesarias.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería, Mario Alberto, Juan Carlos, Emmanuel, David e Irving, por acompañarme a lo largo de esta etapa que considero la mejor de mi vida y apoyarme en todo momento.

A mis amigos del Instituto de Ingeniería, Vladimir y Kukultzin, por todo el apoyo y orientación que me brindaron para la realización de este trabajo.

A Jessica Becerra por estar conmigo incondicionalmente y apoyarme en este proceso.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, por aportar mediante el programa de la Universidad Nacional Autónoma de México, PAPIIT DGAPA-IA103515, el apoyo financiero indispensable para la realización de este proyecto.

A mis sinodales, Dr. William Vicente y Rodríguez, M.I. José Esteban Barrios Bonilla, Dr. Eduardo Medina Hernández, Dr. Rogelio Soto Ayala, por las observaciones y consejos que me permitieron finalizar este proyecto.

A todos, muchas gracias.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	2
INTRODUCCIÓN	2
1.1 OBJETIVOS	5
1.2 JUSTIFICACIÓN	5
1.3 ESTADO DEL ARTE	6
1.4 DESCRIPCIÓN DE LA TESIS	8
CAPÍTULO 2	9
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	9
2.1 CHORRO SIMPLE	9
2.2 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS CAMPOS DE FLUJO EN CHORROS	10
2.3 TIPOS DE CHORROS	12
2.3.1 CHORRO LIBRE	13
2.3.2 CHORRO POR FLOTACIÓN	14
2.3.3 CHORRO DE PARED	15
2.3.4 CHORRO CONFINADO	16
2.4. MEZCLA POR DIFUSIÓN	18
CAPÍTULO 3	20
CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO	20
3.1. SISTEMA DE SUJECIÓN	23
3.2. SISTEMA DE INYECCIÓN	25
CAPÍTULO 4	26
SISTEMA DE CONTROL	26
4.1. DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO EN LOS INYECTORES	26
4.2. CONTROL DE FLUJO	30
4.3. CONTROL DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	31
CAPÍTULO 5	36
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
5.1. CONCLUSIONES	38
5.2. RECOMENDACIONES	39
5.3. TRABAJOS FUTUROS	40

APÉNDICE 1	41
.....	41
APÉNDICE 2	42
REFERENCIAS	43

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La combustión es uno de los procesos más importantes en la obtención de energía para la actividad humana y a pesar de los avances en energías renovables se prevé que seguirá así por varios años más. Desafortunadamente los productos de la combustión también son una de las mayores causas de la contaminación del aire. Ejemplos: NO_x^1 , SO_x^2 , CO^3 , CO_2^4 , hollín e hidrocarburos no quemados. Debido a esto se ha incrementado la demanda sobre los diseñadores de los sistemas de combustión para mejorar su eficiencia y reducir emisiones. Los procesos aerodinámicos juegan un papel importante en las llamas, las cuales son importantes en el proceso de combustión.

Las emisiones de SO_x son en gran parte una función de la química del combustible y por lo tanto, existe poco que pueda hacerse para influenciar esta especie, pero los otros contaminantes se ven afectados perceptiblemente por el proceso de combustión y la eficiencia con la cual se utilice la energía liberada. Por ejemplo, las emisiones de CO_2 , que son la causa más importante del calentamiento global del planeta, se relacionan con la cantidad de combustible quemado y por consiguiente con la eficiencia de combustión. Para obtener una reducción en las emisiones del CO_2 se tienen que hacer mejoras en el proceso de combustión, en la eficiencia de la transferencia de calor y en la subsiguiente utilización de la energía. Por otra parte, la formación de CO y hollín es casi completamente dependiente del proceso de combustión, las emisiones NO_x son función tanto de la química del combustible como del proceso de combustión, particularmente del contenido de nitrógeno en el combustible, de la temperatura de la llama y de las concentraciones de oxígeno dentro de ella. La mezcla combustible/aire del chorro es una parte importante de muchos procesos

¹ Símbolo de los óxidos de nitrógeno.

² Símbolo de los óxidos de azufre.

³ Monóxido de carbono.

⁴ Dióxido de carbono.

como en la combustión empleada en la industria. Es bien conocido que la longitud y forma de la llama, así como su rapidez de liberación de calor dependen en gran medida de las características de la mezcla. La química de oxidación de los hidrocarburos es muy compleja, pero ninguna de las reacciones se puede llevar a cabo hasta que el oxígeno del aire entre en contacto con el combustible. En suma, todo el proceso de combustión se lleva a cabo de la siguiente forma: mezclado, ignición, reacción química y dispersión de productos.

En la mayoría de los sistemas de combustión industrial, el mezclado entre el combustible y el aire es lento, mientras que los otros pasos son muy rápidos. La rapidez y lo completo del proceso de combustión dependen de la mezcla combustible/aire. Una mezcla insuficiente produce CO e hidrocarburos no quemados en los gases producto de la combustión, lo que es un desperdicio de combustible. Para una buena combustión se necesita un suministro adecuado de aire y que el quemador mezcle efectiva y eficientemente las corrientes de aire y de combustible. Normalmente se presenta fricción entre la frontera del chorro (mezcla de combustible y aire primario) y sus alrededores, ocasionando que el aire secundario que lo rodea se acelere localmente hasta la velocidad del chorro. El chorro succiona al aire acelerado, lo que provoca que el primero se expanda (Figura 1).

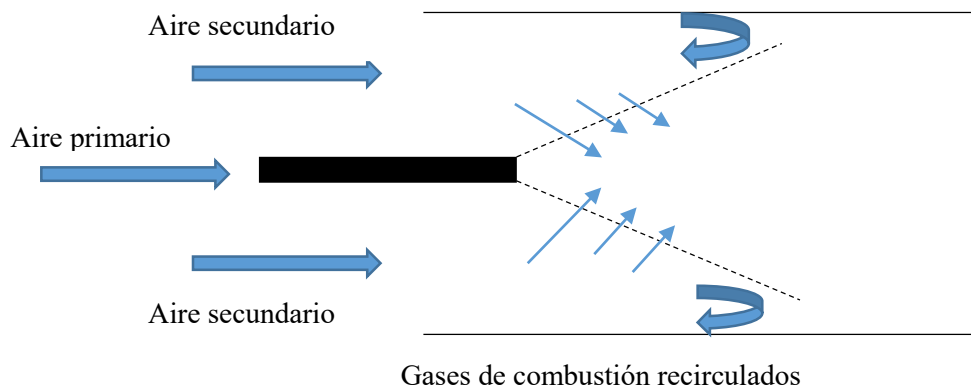


Figura 1. Arrastre y recirculación en un chorro confinado.

Dentro de un horno la rapidez de la mezcla combustible/aire y la cantidad de exceso de aire determinan la transferencia de calor y la longitud de la llama. Por lo anterior es de esperarse que si se incrementa la rapidez de la mezcla combustible/aire o el exceso de aire, entonces se tendrá una llama más corta. También se puede esperar que si se aumenta la velocidad y el flujo másico del aire primario, entonces se llevará a cabo con mayor rapidez la mezcla combustible/aire. Por consiguiente, un concepto importante en la mezcla de las especies es la turbulencia del flujo que permite tener algunas características, tales como: fluctuaciones aleatorias de presión y velocidad, vórtices de diferentes tamaños con movimiento auto sostenido y un proceso de mezclado muy fuerte.

“En fenómenos de combustión turbulenta, se requiere de un mezclado de especies en proporciones que permitan la mayor liberación de energía (poder calorífico) durante el proceso de oxidación. Existen dos tipos de procesos de mezclado: pre-mezcla y por difusión. En la pre-mezcla el combustible y el comburente pueden mezclarse antes de la zona de combustión, mientras que por difusión, la mezcla se realiza en la zona de combustión. Una combustión por pre-mezcla alcanza los límites de inflamabilidad⁵ al momento de inyectarse a la zona de reacción. La combustión es más eficiente por su carácter homogéneo anticipado de mezcla y la flama no alcanza grandes longitudes, lo que permite reducir el tamaño de la cámara de combustión. Sin embargo, presenta problemas de retro llama durante el control del proceso de la combustión. Por otra parte, en una combustión por difusión el combustible y el comburente son inyectados de manera independiente y la reacción exotérmica inicia cuando se alcanzan los límites de inflamabilidad en la zona de reacción. Siendo esta una combustión menos eficiente ya que alcanza una temperatura de llama menor en comparación con la premezclada.

Las ventajas de una combustión por difusión son la longitud de la llama y la imposibilidad de que se presente el fenómeno de retro llama. Por consiguiente, el presente trabajo plantea el estudio del proceso de mezclado por difusión en arreglo de chorros 4-Lug-Bolt confinados y se analizan los mecanismos físicos del proceso de mezcla de especies.”¹³

⁵ Límites de concentración superior e inferior de un gas inflamable, sobre o debajo de los cuales no ocurre propagación de la llama en contacto con una fuente de ignición.

1.1 OBJETIVOS

General:

- El objetivo principal de la tesis es construir un modelo físico que permita estudiar el proceso de mezclado por difusión molecular.

Alcances:

- Proponer un sistema de control para la inyección de chorros en el proceso de mezclado de especies.
- Proponer un modelo que permita estudiar diferentes configuraciones de inyección de chorros.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El estudio de la dispersión de chorros por difusión en un arreglo de boquillas del tipo Lug Bolt permite su aplicación a fenómenos de combustión turbulenta en flamas por difusión que ocurre cuando el combustible y el comburente se mezclan en la zona de combustión. La llama por difusión presenta un rango de velocidad de reacción más elevado, de mayor longitud, con respecto a la premezclada, y es más segura porque no presenta el fenómeno de retrollama (no existe una mezcla reactiva al interior de los inyectores). La mayoría de los estudios enfocados en llamas por difusión sólo analizan la química de la combustión y no se enfocan en la dispersión de las especies. Los análisis de la zona de reacción permiten identificar que la reacción no es homogénea debido a que puede presentarse un caso donde el flujo de combustible es mayor que el de comburente y otro donde la región de alta concentración de comburente se desplaza hacia el lado del combustible. Estos cambios de concentración

ocasionan una combustión incompleta o completa, respectivamente. Por tal motivo, el desarrollo y construcción de un modelo físico permitirá el estudio experimental de la dispersión de chorros por difusión con la finalidad de identificar los mecanismos relevantes en el proceso de mezcla. El modelo físico debe considerar la posibilidad de modificar el arreglo de boquillas con la finalidad de plantear esquemas de inyección de especies que permitan un mezclado más homogéneo para mejorar la eficiencia de combustión de las llamas por difusión.

1.3 ESTADO DEL ARTE

En la literatura abierta existen diversos trabajos enfocados en la dispersión de chorros libres y confinados. En lo referente a los chorros libres, existen diversos estudios de tipo analítico que sólo se enfocan a la estructura del flujo como los trabajos desarrollados por [Reichardt]¹, [Rajaratnam]², [Pani]³. Otros trabajos plantean análisis semi-analíticos o numéricos con un enfoque aplicativo. Por ejemplo, [Bulis et al.]⁴ analizaron la región baja de transición en chorro libre basado en una recopilación experimental de la región de flujo transitorio en un chorro libre axial-simétrico de fluido viscoso e incompresible expulsado por una boquilla con perfil cilíndrico y de tubo largo. El estudio concluyó que los efectos viscosos pueden tener una influencia significativa en valores del número de Reynolds (calculados a partir de los parámetros de salida) del orden de 1×10^3 a 2×10^4 . Posteriormente, [Aziz y Rainford]⁵ presentaron un estudio en chorros turbulentos planos y circulares no flotantes tridimensionales, cuyo objetivo fue evaluar la exactitud de los esquemas de cierre de turbulencia empleados en modelos tridimensionales. En particular, fueron evaluados varios grupos de esquemas $k-\varepsilon$ estándar y $k-\varepsilon$ re-normalizado con coeficientes estándar. La precisión de los esquemas de turbulencia fue evaluada mediante el análisis del decaimiento de la velocidad en la línea central, tasa de crecimiento del chorro, la similitud de los perfiles de velocidad longitudinal y vertical y los perfiles de energía cinética turbulenta mediante el impacto de la superficie libre y las fronteras sólidas en los chorros. Por su parte, [Faghani y Rogak]⁶ presentan un estudio numérico y analítico de la estructura y el desarrollo de flujos planos (bidimensionales) de chorros turbulentos. Los resultados numéricos son utilizados para desarrollar una solución aplicada al campo experimental.

En lo referente a chorros confinados, existen diversos trabajos numéricos y experimentales enfocados a su aplicación en fenómenos de combustión turbulenta o en fenómenos físicos enfocados a su aplicación en combustión por difusión. Por ejemplo, [Seider y Churchill]⁷ realizaron una simulación numérica de un chorro axial laminar dentro de una corriente confinada anular. El estudio fue conducido para determinar la eficiencia de mezcla en un reactor que profundiza en el análisis del flujo. Sin embargo, el trabajo es limitado debido a que el estudio sólo se enfoca en la salida de los chorros y desprecia los efectos de recirculación de premezcla. Posteriormente, [Adair et al.]⁸ determinan los parámetros de concentración en un chorro turbulento de metano antes de la ignición y los comparan con mediciones experimentales. El trabajo plantea un método capaz de estimar el mezclado de especies en un sistema de combustión mediante concentraciones medias y las fluctuaciones del flujo en chorro libre. Posteriormente, [Wen y Huang]⁹ compararon tres modelos de combustión (Flamelet, Constrained Equilibrium y Eddy Break-Up) para determinar predicciones de campo de dos chorros confinados en condiciones de ventilación controlada. Los resultados fueron comparados con datos experimentales y mostraron que el modelo de combustión Flamelet presentó las mejores predicciones numéricas. Por su parte, [Berg et al.]¹⁰ presentan un análisis numérico efectuado para un flujo turbulento de un chorro libre confinado con dos modelos de turbulencia ($k-\varepsilon$ y $k-\omega$). Los resultados mostraron que el modelo $k-\varepsilon$ con velocidad de entrada perfilado tuvo mejores predicciones de las principales características del flujo. [Mompó]¹¹ realizó estudios aplicándolos a motores de combustión interna. En su trabajo realizó un análisis completo de la difusión de especies (diésel, oxígeno) para determinar los factores que afectan al chorro de diésel mediante modelos de simulación euleriano y lagrangiano. Finalmente, los trabajos desarrollados por [Cervantes et al.]¹² y [Martínez et al.]¹³ plantean análisis numéricos de la dispersión de chorros de oxígeno y metano mediante un arreglo de boquillas 4 Lug-Bolt. En estos trabajos se concentran en los límites de inflamabilidad inferior y superior pero las predicciones no están validadas experimentalmente.

La revisión del estado del arte muestra que existen insuficientes datos experimentales o numéricos para chorros circulares cerrados que fluyen en sistemas circulares. Por tal motivo, surge la necesidad de estudiar a detalle la dispersión de chorros para mejorar la eficiencia de combustión en flamas por difusión. Por otra parte, existen pocos trabajos enfocados a la dispersión de chorros en arreglos de boquillas del tipo Lug Bolt.

1.4 DESCRIPCIÓN DE LA TESIS

El presente trabajo de tesis plantea el desarrollo de un modelo físico para el estudio del proceso de mezcla por difusión en un sistema confinado con un arreglo de boquillas 4 Lug-Bolt. El trabajo se divide en 5 capítulos: introducción, fundamentos teóricos, construcción de modelo físico, control del sistema y conclusión. El primer capítulo define el problema a estudiar, describe los objetivos, presenta un análisis del estado del arte y plantea la justificación de trabajo de tesis. El segundo capítulo presenta los antecedentes teóricos necesarios para la comprensión de los conceptos de la dispersión de chorros y el proceso de mezcla por difusión. El tercer capítulo describe el proceso de conceptualización y construcción del modelo físico, así como una breve descripción del equipo utilizado. El cuarto capítulo presenta el sistema de control que se implementa en el modelo físico para garantizar una adecuada visualización del fenómeno físico. El quinto capítulo presenta las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros planteados en el proceso de construcción del modelo físico. Esta información establece las bases de operación del modelo para el desarrollo de experimentos de visualización del flujo.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En la mayoría de las operaciones de la industria química, el mezclado de especies es utilizado para muchos procesos fisicoquímicos. La mezcla de especies puede realizarse mediante procesos mecánicos que requieren un suministro de energía mecánica o mediante procesos difusivos como la dispersión de chorros. Los chorros son clasificados en varios tipos por sus efectos con el medio que los rodea y por estas razones son utilizados en muchas aplicaciones industriales. A continuación se explicará qué es un chorro, las partes que lo componen y los diferentes tipos que existen.

2.1 CHORRO SIMPLE

Un chorro simple se define como un fluido que emerge de un inyector a una determinada velocidad e interactúa con el medio circundante para formar una mezcla de fluido, se compone de tres zonas: región inicial o núcleo potencial, región de transición y región turbulenta (Figura 2.1). El núcleo potencial es la zona en la cual la velocidad y la concentración del fluido que proviene del inyector permanecen sin cambios, la longitud de esta zona varía de 4 a 5 diámetros de la boquilla del inyector. La región de transición es donde se desarrolla una capa límite libre, en la cual se transfieren el momentum y la masa perpendicularmente a la corriente; como resultado, se forma una región de espesor finito con una distribución continua de la velocidad, la temperatura y concentración de especie en el límite entre los dos chorros. La longitud de esta zona vale 10 diámetros de la boquilla del inyector aproximadamente. Después, a unos 15 diámetros en dirección de la corriente se encuentra la región turbulenta donde los perfiles de velocidad alcanzan una forma similar basada en la velocidad de línea central y el diámetro del chorro a la distancia axial de la boquilla.

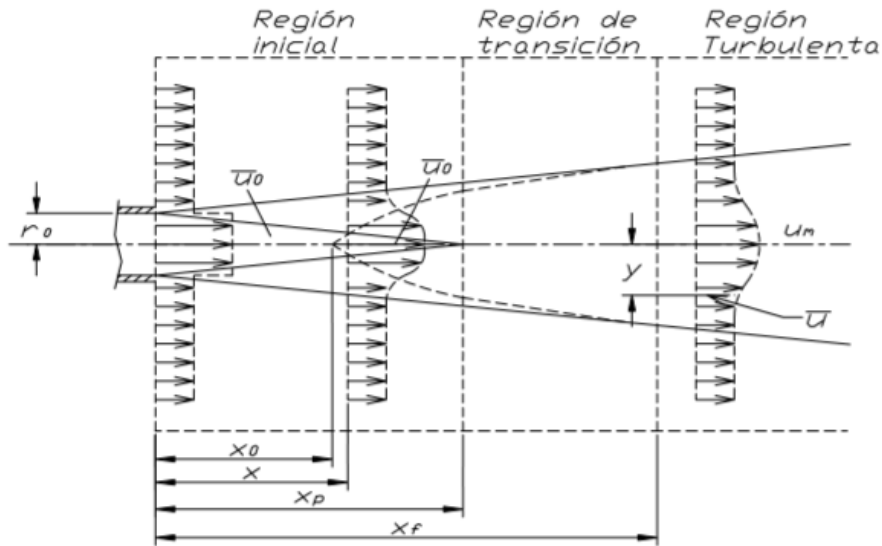


Figura 2.1. Zonas que componen a un chorro simple (Abramovich 1963).

2.2 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS CAMPOS DE FLUJO EN CHORROS

Los campos de flujo pueden representarse de muchas formas, por ejemplo para diferentes secciones transversales las distribuciones de velocidad se pueden mostrar en forma de perfiles de velocidad axial, de líneas de velocidad constante, de líneas de velocidad relativa constante ($U/U_m = \text{cte.}$) o se pueden dibujar líneas de corriente a partir de la integración de los perfiles de velocidad.

Los perfiles de velocidad muestran las condiciones de salida y los cambios progresivos que se presentan a medida que el chorro se mueve a través de las diferentes regiones. Los perfiles en esta forma no son convenientes para describir los campos de flujo en la región corriente abajo donde las velocidades son bajas. (Figura 2.2).

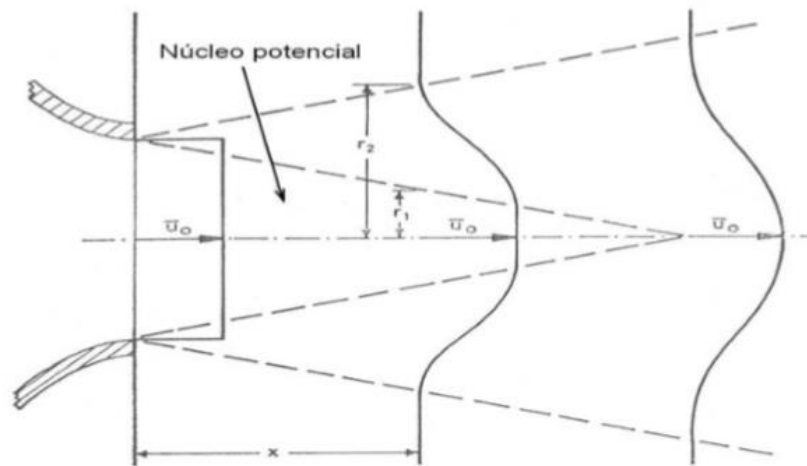


Figura 2.2. Perfiles de velocidad cerca de la salida del chorro (Chigier 1972).

Las líneas de velocidad relativa constante referidas a la velocidad máxima de cada sección transversal, en particular ($U/U_m = \text{cte.}$), se pueden considerar como rayos emanando desde un origen aparente. Tales líneas se utilizan para la determinación del ángulo del chorro, el cual se define por el ángulo entre el eje y uno de esos rayos, $\alpha_{0.5}$ es el ángulo del chorro determinado a partir de la línea $U/U_m = 0.5$ y $\alpha_{0.1}$ se determina de la línea $U/U_m = 0.1$. (Figura 2.3).

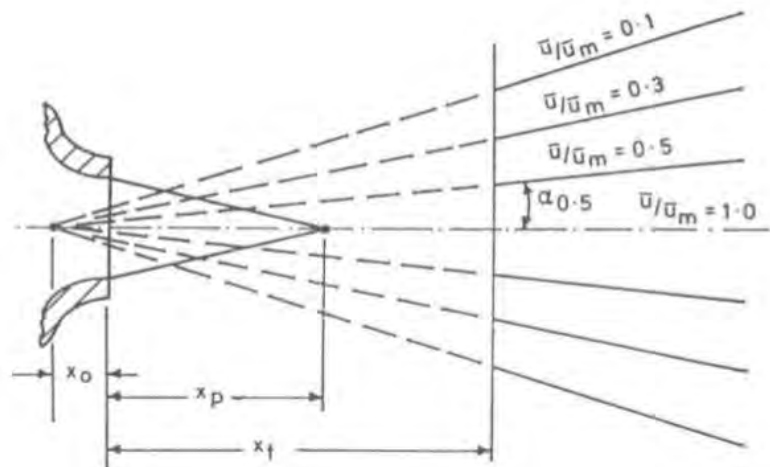


Figura 2.3. Líneas de velocidad constante en la región inicial del chorro (Abramovich 1963).

Los contornos de un chorro se representan mediante líneas de velocidad constante; esas líneas constan de una serie de envolventes, las cuales convergen finalmente sobre el eje, y se pueden dibujar para representar valores de velocidad o alternativamente en forma adimensional en donde la velocidad está dividida por la velocidad de salida ($U/U_0 = \text{cte.}$). Los cambios en el gradiente de velocidad se representan mediante cambios en la cantidad de líneas. Las líneas de velocidad constante tienen relevancia directa en el estudio de flamas. (Figura 2.4).

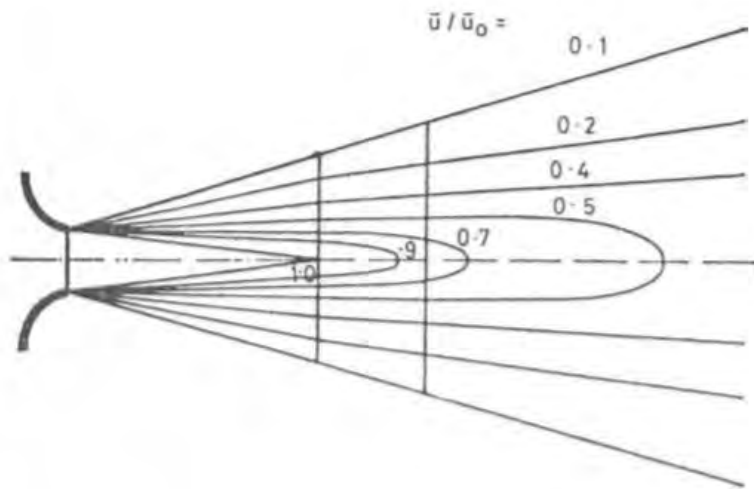


Figura 2.4. Líneas de velocidad relativa constante (Abramovich 1963).

2.3 TIPOS DE CHORROS

Dentro del estudio del flujo de fluidos encontramos el impacto de los chorros como base para el desarrollo de la teoría de mecánica de fluidos y turbomáquinas hidráulicas. Una forma de producir trabajo mecánico a partir de un fluido bajo presión es usar la presión para acelerar el fluido a altas velocidades de un chorro, dando como resultados múltiples aplicaciones. Por ejemplo: la mezcla de combustible-aire en sistemas de combustión, corte por chorro de agua, flujo constante en tuberías, presurización de aire, aire acondicionado por medio de vigas frías, aplicaciones en bombas, etc.

2.3.1 CHORRO LIBRE

Un chorro libre puede ser clasificado como un flujo de salida de una boquilla dentro de un gran ambiente inactivo. El proceso de mezclado con el fluido circundante (arrastre) crea turbulencia y en consecuencia aumenta la anchura del chorro hasta una distancia donde se disipa. Un chorro libre tiene dos regiones principales, el flujo de estabilización (desarrollo) región que continúa con una velocidad media constante que se origina de la línea central hasta el extremo del núcleo potencial de chorro; la establecida o la también denominada región completamente desarrollada que comienza desde el final de la región del núcleo. Debido a un proceso de mezcla turbulenta y el arrastre del flujo hasta el ambiente, el borde del chorro no es recto, pero la presentación de la anchura del chorro en la dirección aguas abajo supone una línea recta promedio. En la Figura 2.3.1 se encuentra aguas arriba de la salida de la boquilla, pero esto puede variar de un caso a otro. Este punto se puede obtener mediante ajuste a los valores medidos en diferentes ubicaciones aguas abajo curva.

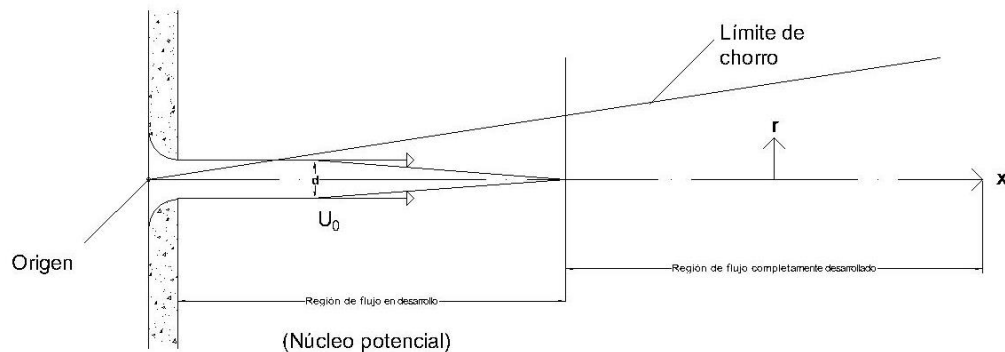


Figura 2.3.1. Chorro libre.

2.3.2 CHORRO POR FLOTACIÓN

Los chorros por flotación y las plumas son definidos como fluidos puros que son manejados totalmente por la cantidad de movimiento y los efectos de la fuerza de sustentación respectivamente. Los flujos entre estos límites son usualmente descritos como plumas forzadas o chorros por flotación. La flotación es considerada positiva cuando ocurre en ausencia de otras fuerzas o por el simple movimiento inicial. En situaciones donde la densidad del fluido de la pluma es mayor que su entorno (a condiciones fijas) pero el flujo tiene suficiente impulso inicial para llevarlo a cierta distancia vertical se considera como negativa. (Figura 2.3.2).

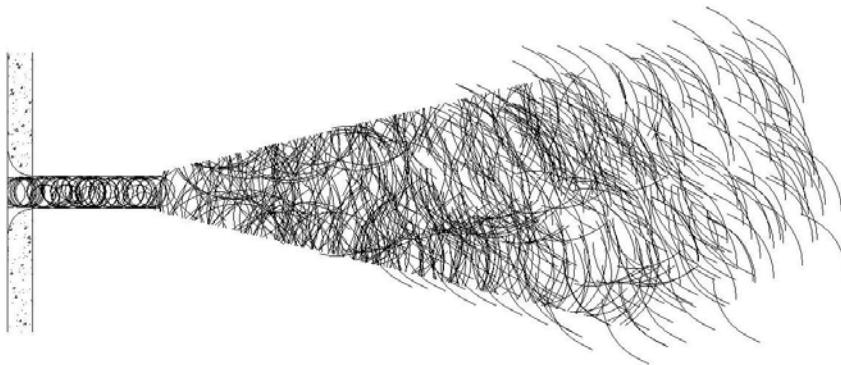


Figura 2.3.2. Ejemplo de chorro Bouyant.

2.3.3 CHORRO DE PARED

Por definición, un chorro que está rodeado por una pared se llama chorro de pared y es de interés en diversas aplicaciones industriales. Por ejemplo, el flujo sobre superficies sustentadoras, flujo a lo largo de aspas de turbinas y compresores y en las superficies de las habitaciones. Los chorros de pared turbulentos difieren de chorros libres debido a los efectos de la pared de amortiguación y pertenecen a un grupo importante de los flujos de cizalla. Se pueden dividir en dos capas: 1) una capa interna (o región de la capa límite) hasta el punto de velocidad máxima, que se divide básicamente en dos subcapas, que es una región de la pared aproximadamente hasta $0,7 U_{max}$ veces de velocidad máxima, y una capa interior externa, es decir, desde el punto de $0,7 U_{max}$ hasta el punto de U_{max} y 2) una capa externa (capa de cizalladura libre). Estos tipos de chorros tienen mucha aplicación en el área de aire acondicionado. (Figura 2.3.3).

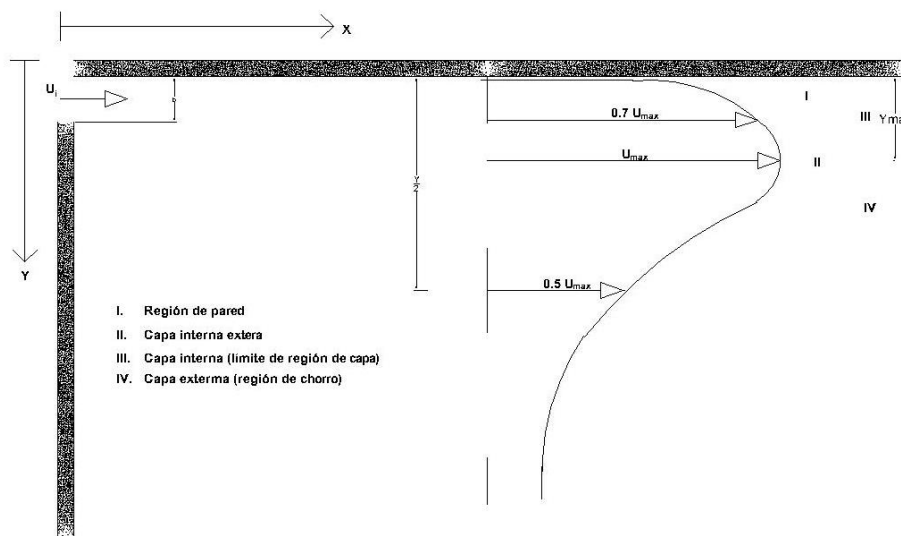


Figura 2.3.3. Chorro de pared.

2.3.4 CHORRO CONFINADO

Un chorro confinado está conformado por un medio físico que lo rodea y a diferencia de un chorro libre el encierro afecta significativamente las características hidrodinámicas del mismo. Los chorros confinados turbulentos se encuentran en varias aplicaciones como bombas de chorro, eyectores, cámaras de combustión, etc.

La figura 2.3.4 muestra las características cualitativas del chorro turbulento confinado. El núcleo potencial se extiende desde la boquilla y es la parte central del flujo en el cual la velocidad se mantiene constante y casi igual a la velocidad de la boquilla. Este chorro se forma como resultado de la mezcla turbulenta que se origina cerca de la punta de la boquilla. El extremo de la región potencial de núcleo se denomina como el origen virtual. La velocidad del chorro en la boquilla (U_N) es una constante y la relación de la U_N / U_C aumenta como resultado de la siguiente expresión:

$$\frac{U_N}{U_C} = \frac{1(X - X_0)}{K D_N}$$

Donde:

D_N es el diámetro de la boquilla.

K es el coeficiente de pérdida de velocidad y es adimensional.

U_C es la velocidad.

U_N es la velocidad de la boquilla.

X es la distancia axial desde la punta de la boquilla

X_0 es la distancia axial de origen virtual de la punta de la boquilla.

La propagación del chorro normalmente se caracteriza en términos de la mitad del radio, $r_{0.5}$. Esta es la distancia radial desde la línea central a la cual la velocidad media axial es la mitad de su valor central. En el flujo de chorro, debido a la cizalladura del gradiente de velocidad se generan los vórtices turbulentos. La causa de esta turbulencia son el arrastre del fluido circundante en el flujo de chorro. Por lo tanto, la anchura de la zona de mezcla aumenta con la distancia aguas abajo, después de la región del núcleo potencial.

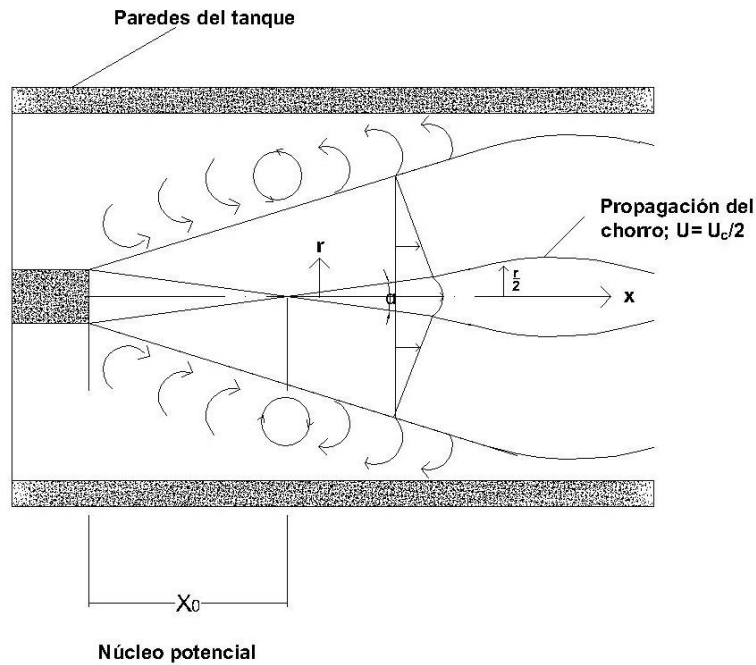


Figura 2.3.4. Chorro confinado.

2.4. MEZCLA POR DIFUSIÓN

La difusión es el movimiento, bajo la influencia de un estímulo físico, de un componente individual a través de una mezcla. La causa más frecuente de la difusión es un gradiente de concentración del componente que difunde. Un gradiente de concentración tiende a mover el componente en una dirección tal que iguale las concentraciones y anule el gradiente.

Aunque la causa habitual de la difusión es un gradiente de concentración, en ocasiones la difusión también se origina por un gradiente de actividad, por un gradiente de presión, un gradiente de temperatura o por la aplicación de un campo de fuerza externa.

La difusión no está restringida a la transferencia molecular a través de capas estacionarias de un fluido. También tiene lugar cuando se mezclan fluidos de diferentes composiciones. Con frecuencia, el primer paso en la mezcla es la transferencia de masa causada por el movimiento de remolinos característicos de masa causada por el movimiento de los remolinos característicos del flujo turbulento. A esto se le llama difusión por remolino. El segundo paso es la difusión molecular entre y dentro de remolinos pequeños. A veces el proceso de la difusión va acompañado de flujo global de la mezcla en una dirección paralela a la dirección de difusión.

Existen semejanzas entre la conducción de calor y la transferencia de masa por difusión. El flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura y el flujo de masa es proporcional al gradiente de concentración. El flujo neto de calor determina la velocidad del cambio de temperatura de un material, y el flujo de masa determina la velocidad de cambio de concentración. Estas semejanzas permiten solucionar las ecuaciones para conducción de calor al adaptarse a los problemas de la difusión en sólidos y líquidos.

Esto es en especial útil para los problemas de la difusión en estado no estacionario a partir de las muchas soluciones publicadas para la transferencia de calor en estado estacionario.

Las diferencias entre la transferencia de calor y la transferencia de masa resultan del hecho de que el calor no es una sustancia, sino energía en transición, mientras que la difusión es el flujo físico del material.

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO

Para la construcción del modelo físico se optó por acrílico como material de fabricación ya que éste al ser un material transparente, nos brindará la visualización del fenómeno. Se propusieron dos geometrías: 1) una de ellas en forma de tubo y 2) otra en forma de ducto, ambas con las siguientes características: una base de 101,6 x 101,6 mm y con una longitud de 500 mm de largo. El arreglo de las boquillas Lug-Bolt está conformado por una boquilla central de 13,3 mm y cuatro boquillas periféricas de 3,3 mm de diámetro. La distancia de centro a centro de la boquilla central respecto a las boquillas periféricas es de 33,87 mm. (Figura 3).

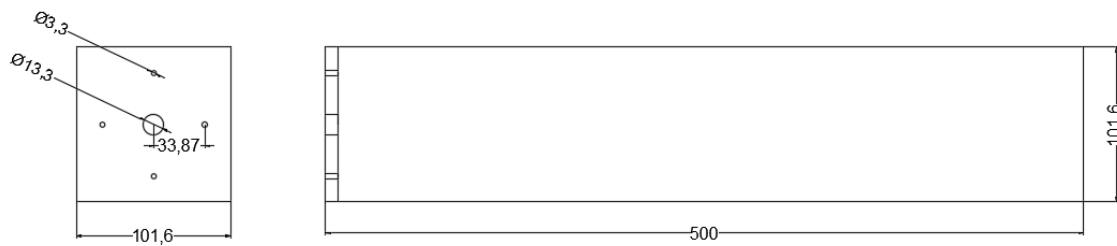


Figura 3. Geometría en forma de ducto.

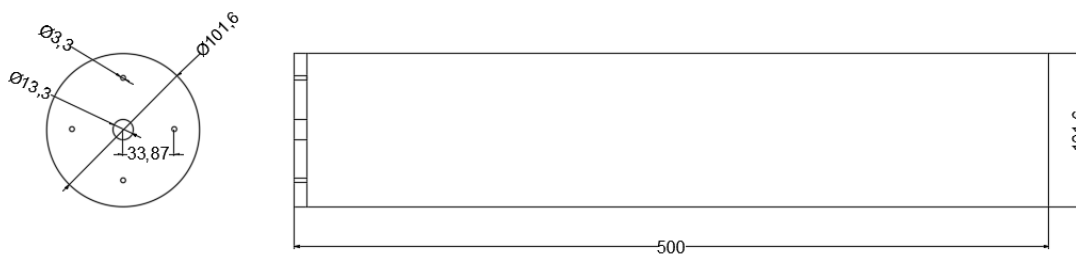


Figura 3. Geometría en forma de tubo.

El prototipo se realizó con base en la geometría en forma de ducto debido a la imposibilidad de realizar mediciones del campo de velocidades mediante técnicas de anemometría láser PIV. La propuesta de ducto fue llevada a cabo por placas de acrílico de 3 mm de grosor que servirían como paredes y con una placa de 8 mm que fungiría como la tapa todo bajo el proceso de corte láser. (Figura 3.1).

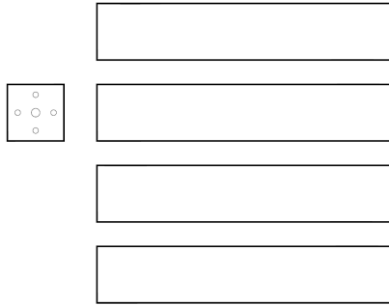


Figura 3.1. Plano de corte láser.

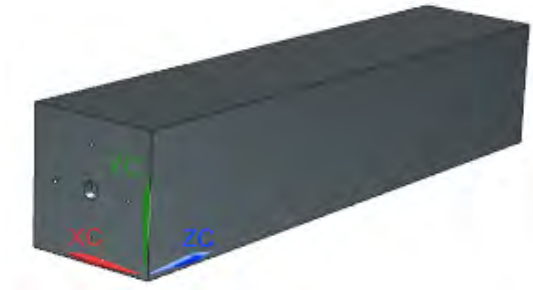


Figura 3.2. CAD de ducto.

El ducto de acrílico cumple perfectamente las cualidades de visualización pero carece de resistencia debido al grosor de las paredes. Se observa un detalle en la tapa del ducto, la cual es rígida, lo que provoca la imposibilidad de estudiar otras configuraciones geométricas del arreglo de boquillas. Por ejemplo: un estudio para el análisis de inyección de un solo chorro libre confinado ocasionaría un nuevo prototipo.



Etapa 1 modelo físico.

Con base en la información recabada del modelo físico se propuso la siguiente propuesta: modificar las dimensiones de las paredes, adicionar una tapa más e incorporar un sistema de sujeción (Figura 3.3).

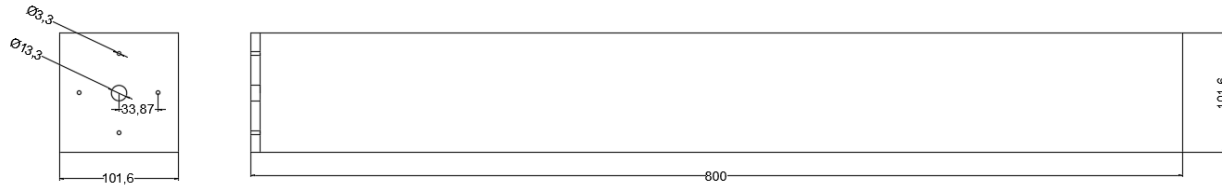


Figura 3.3. Plano modificado.

La manufactura se realizó con placas de acrílico de 8 mm de espesor y bajo el proceso de corte láser y la unión de las juntas por AD- CRYL⁶. (Figura 3.5).

La nueva geometría del ducto permitirá tener mayor resistencia lo que se ve reflejado en movilidad y la incorporación del sistema de sujeción para el intercambio de las tapas lo que conlleva a nuevos estudios sin la necesidad de generar nuevos prototipos porque únicamente se tendrían que fabricar nuevas tapas con el arreglo a estudiar.

La longitud de tapa a tapa se calculó a partir del perfil desarrollado obtenido en el apéndice 1.

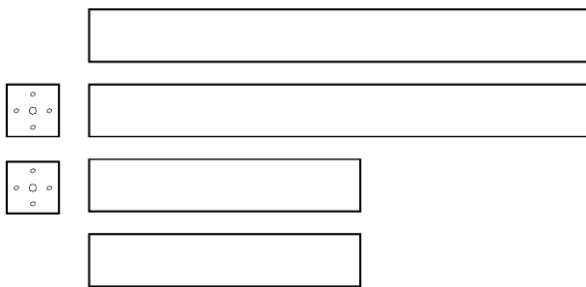


Figura 3.4. Plano de corte láser modificado.

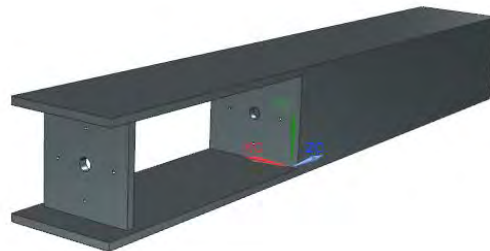
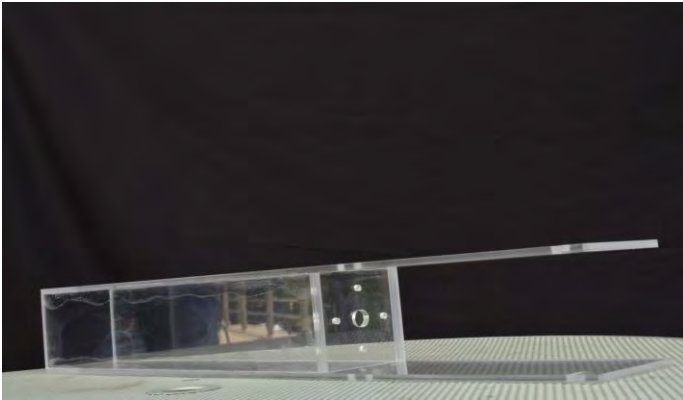


Figura 3.5. CAD de ducto de acrílico con nueva geometría.

⁶ Pegamento de acrílico.



Etapa 2 modelo físico.



Etapa 2 modelo físico.

3.1. SISTEMA DE SUJECIÓN

El sistema de sujeción está formado por una placa de acero comercial de 101,6x25,4 mm por 3 mm de espesor que funciona como base, en los extremos de la placa se encuentran dos tuercas soldadas mediante arco eléctrico con una separación 76 mm de centro a centro. Cuenta con dos pernos los cuales permitirán el sellado correcto de la tapa con el ducto, minimizando tanto pérdidas de flujo como fugas además de permitir el intercambio entre tapas. Este sistema se incorporará en dos de las paredes de mayor longitud por medio de dos tornillos de acero al carbono. (Figura 3.6).

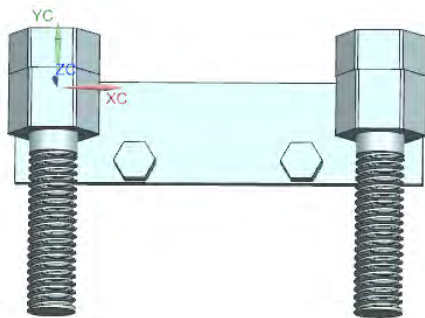


Figura 3.6. Sistema de sujeción.



Sistema de sujeción físico.



Sistema de sujeción físico.

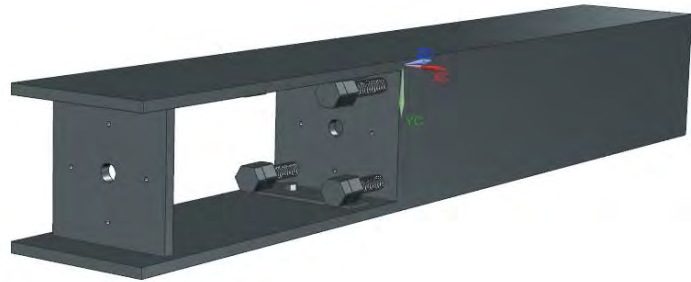
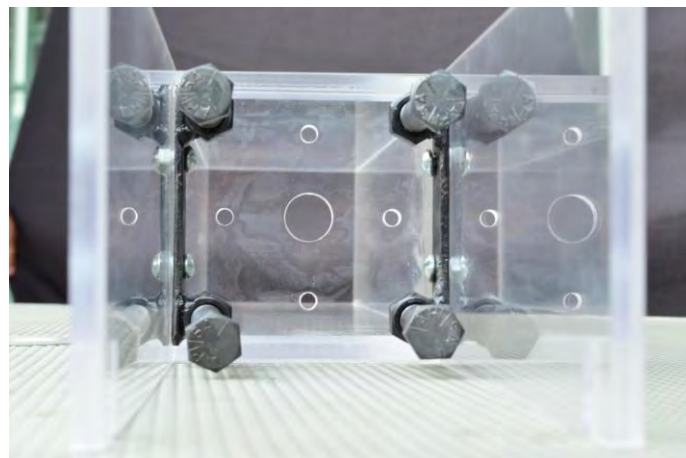


Figura 3.7. CAD sistema de sujeción.



Sistema de sujeción instalado a prototipo físico.

3.2. SISTEMA DE INYECCIÓN

Los inyectores fueron simulados por 5 tubos de acrílico: 4 para las boquillas periféricas de 3,7 mm de diámetro y 1 para la boquilla central de 19 mm de diámetro nominal. Las distancias fueron seleccionadas a partir del concepto de flujo desarrollado en tuberías que se muestra en el apéndice 1. (Figura 3.8).

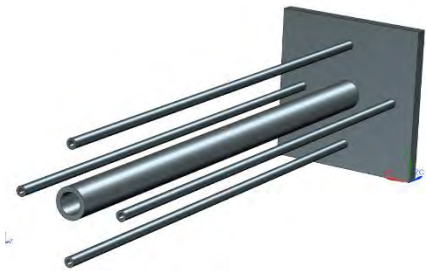


Figura 3.8. Sistema de inyección.

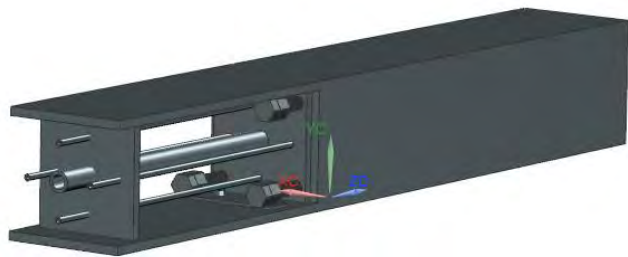


Figura 3.8. CAD reactor acoplado.



*Sistema de inyección físico
instalado.*

En los siguientes capítulos se mostrará el sistema de conexión que se implementó, así como las diferentes configuraciones que se llevaron a cabo para poder ensamblar el modelo físico con el sistema de inyección, se plantearán dos sistemas de inyección: 1) por medio de un generador de partículas sólidas y 2) por medio de un generador de niebla. Además, se discutirán cuáles son sus ventajas y desventajas en su implementación. Finalmente se sugerirán propuestas para trabajos futuros con el objetivo de mejorar y realizar pruebas experimentales.

CAPÍTULO 4

SISTEMA DE CONTROL

El presente capítulo analiza el sistema de control que se utilizará para la visualización del flujo mediante una cámara de alta velocidad. El control del flujo es fundamental para asegurar la velocidad de inyección requerida y las propiedades termodinámicas del fluido idóneas para la correcta visualización del flujo. El sistema se concentra en tres puntos fundamentales: 1) desarrollo de un sistema de distribución del flujo hacia los inyectores, 2) implementación de la regulación del flujo en cada inyector y 3) control de las propiedades del fluido de visualización.

4.1. DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO EN LOS INYECTORES

El sistema de distribución de flujo permite dividir el flujo principal del fluido utilizado para la visualización en cada inyector. La distribución del flujo se realizó mediante la construcción de un accesorio específico para este propósito debido a que no existen accesorios que permiten la división del flujo en cinco caudales como los requeridos en el arreglo de boquillas 4 Lug-Bolt. Este distribuidor fue diseñado a partir de un tubo de acero comercial de 101,6

mm de diámetro externo con un arreglo tipo 4Lug-Bolt en una de sus tapas y en la otra un arreglo simple. (Figura 4.1).

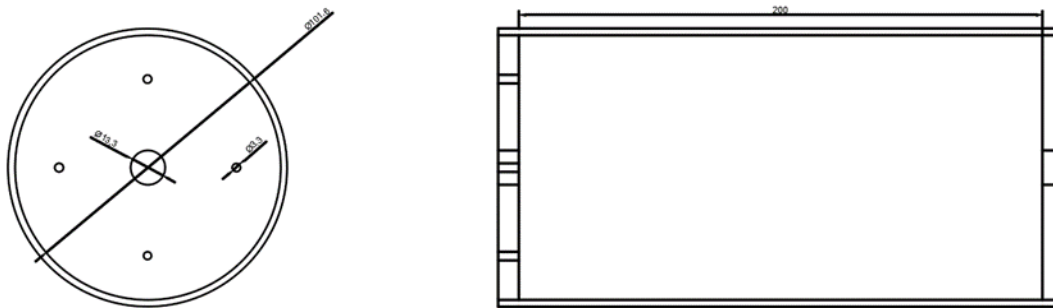


Figura 4.1. Plano de cámara de mezclado.



Figura 4.2. CAD de cámara de mezclado.



Cámara de mezclado física.

El proceso de manufactura de la pieza se realizó bajo un proceso de torneado y fresado donde las juntas fueron realizadas por soldadura tipo TIG. Para hacer coincidir los inyectores del prototipo con la cámara mezcladora se desarrollaron unos bujes, los cuales fueron maquinados a partir de barras de acero comercial para posteriormente soldarlos a la cámara mezcladora (Figura 4.3.). Los bujes fueron realizados en tres arreglos diferentes todos con la finalidad de acoplarse con los inyectores, fueron manufacturados a base de torneado y barrenado. El distribuidor tiene el inconveniente de la generación de zonas de recirculación entre sus paredes y los chorros a la entrada y salida del dispositivo. Esta situación se pretendió corregir mediante la incorporación un perfil biselado en la unión del tubo con las tapas (Figura 4.4) mediante una de pasta para soldar en frío. Este ajuste no es suficiente para garantizar una adecuada distribución del flujo debido a que no se realizó un estudio de la hidrodinámica dentro del distribuidor. Sin embargo, el problema se corrige con el control del flujo en cada inyector mediante válvulas.

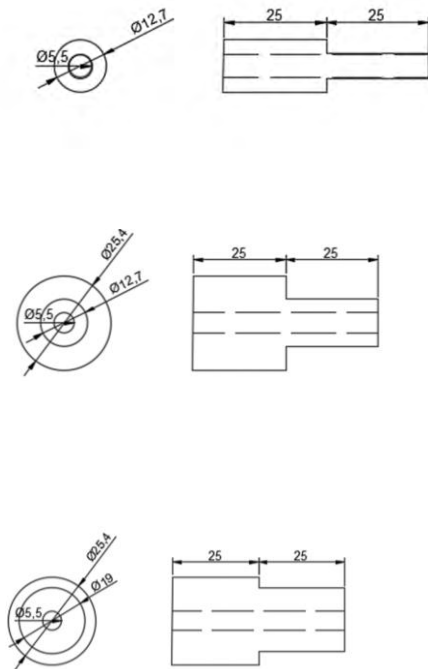


Figura 4.3. Plano de bujes.

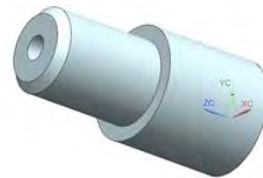
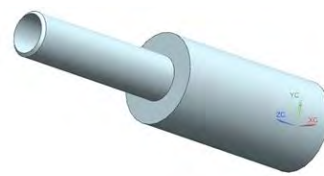


Figura 4.4. CAD de bujes.

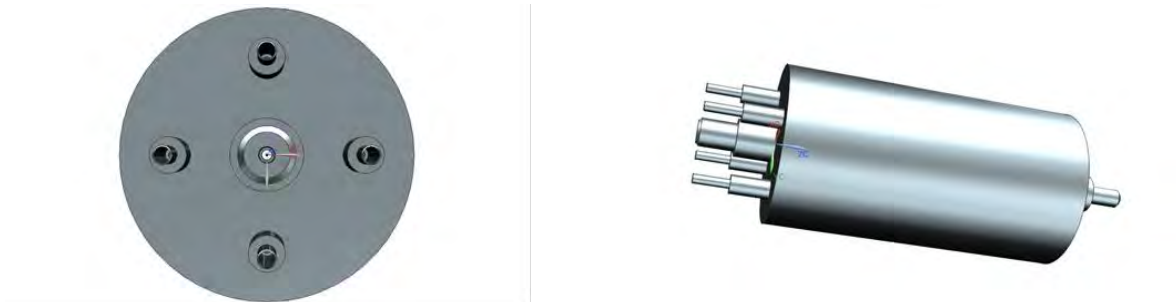
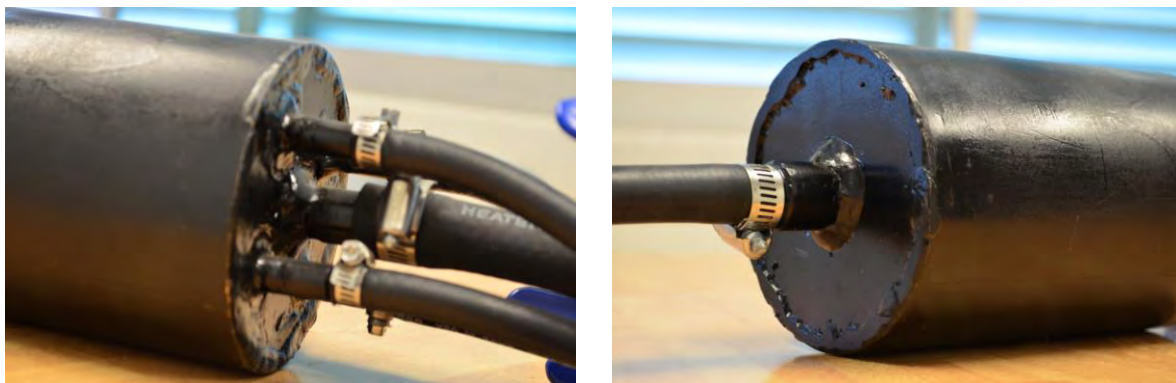


Figura 4.5. CAD de cámara de mezclado.



Cámara de mezclado física.

4.2. CONTROL DE FLUJO

El sistema de control del flujo tiene como objetivo corregir el problema de la distribución de flujo y garantizar el caudal requerido en cada inyector mediante el acoplamiento entre el sistema de inyección del fluido con el modelo físico. El sistema es sumamente importante debido a que una mala conexión ocasionaría perturbaciones en el momento de realizar las pruebas experimentales. La conexión entre el modelo físico y el sistema de inyección se realizó mediante mangueras de alta presión como las utilizadas en los autos. Las mangueras unirán los inyectores del reactor con los bujes de la cámara de mezclado y se asegurarán con abrazaderas en los extremos para evitar fugas de aire. La regulación del flujo se llevará a cabo con válvulas tipo bola por su bajo costo, las cuales se colocan en cada una de las conexiones. La conexión válvula-inyector permite la conexión de un medidor de flujo de bajo caudal, como se muestra en la Figura 4.6, para garantizar que el flujo en cada inyector es el requerido. El procedimiento de regulación de flujo debe realizarse en cada inyector por separado hasta que los valores medidos sean lo deseados.



Figura 4.6. Conexión de válvula-inyección.



Figura 4.6. Conexión de válvula-inyección.

4.3. CONTROL DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO

La elección del fluido a utilizar en el experimento es fundamental para la visualización del flujo, de acuerdo con Wolfgang¹⁴. El trabajo de tesis plantea dos alternativas: 1) niebla producida por un generador de niebla y 2) utilización de aire mezclado con partículas sólidas. La alternativa de la generación de niebla presenta el inconveniente de la condensación de la niebla en la tubería de conexión hacia el modelo físico debido a que el equipo sólo genera vapor saturado. Este vapor al entrar en contacto con el modelo a condiciones ambientales presenta el problema de condensación parcial que no permite la visualización del flujo y que requiere el secado del modelo físico. Para resolver este problema se propone desarrollar un sistema de sobrecalentamiento de niebla con la finalidad de evitar el fenómeno de condensación. Uno de los principales inconvenientes de la propuesta es el diseño del sistema de sobrecalentamiento que permita un calentamiento uniforme y que no afecte su conexión al modelo de acrílico.

Para lograr el objetivo se plantea la incorporación de un turbulador dentro de un tubo para promover turbulencia y asegurar un calentamiento uniforme de la niebla. La fuente de calentamiento adecuada es una resistencia eléctrica pegada a la pared del tubo. Este tipo de resistencia se ajusta a toda la superficie exterior del tubo mediante una pletina y permite un calentamiento constante en las paredes del tubo. La conceptualización del sistema de sobrecalentamiento se presenta en la figura 4.7. El gran inconveniente de esta alternativa está en las pérdidas de presión por las conexiones debido a la poca presión disponible por el generador de niebla y el acoplamiento del sistema de sobrecalentamiento al modelo físico. El desarrollo de experimentos con un generador de niebla es viable mediante la mezcla de niebla con aire impulsado por un mini turbosoplador con finalidad de obtener una presión suficiente para evitar las pérdidas en las conexiones. Por lo tanto, la implementación de este sistema en el experimento es viable mediante un adecuado estudio de escalamiento del fenómeno debido a la diferencia de densidades del aire y niebla.

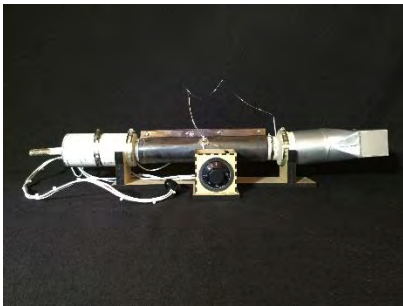


Figura 4.7. Turbulador físico.



Turbulador físico.

La propuesta de aire con partículas sólidas requiere la generación de un vacío para aspirar partículas sólidas y mezclarlas a la corriente de aire. Lo anterior se logró mediante el acoplamiento de una pistola aerográfica a un compresor de baja capacidad a un depósito de partículas sólidas como se muestra en la Figura 4.8. El material considerado para la aspiración de partículas sólidas es el talco que presenta tamaños de partícula de aproximadamente $14,3 \mu\text{m}$, de acuerdo con Shou y Cen¹⁵, y no es tóxico. El depósito de partículas sólidas fue construido con un tubo de acrílico de 4 pulgadas de diámetro y una longitud de 40 cm. Las pruebas se realizaron con un contenido de partículas dentro del

depósito de $8,107 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ a diferentes posiciones de la manguera de succión con respecto al nivel del talco. En todas las pruebas con la pistola aerográfica, sin conexión al modelo físico, la succión del talco fue prácticamente instantánea con la manguera a nivel del sólido. En el caso donde la manguera se alejó a pocos milímetros del nivel del sólido, no se presentó la succión del talco. Este experimento se repitió con otro material sólido (arena fina) con los mismos resultados para las diferentes posiciones de la manguera.



Figura 4.8. Unidad aerógrafa.

El principal inconveniente de esta propuesta es el control de la succión de las partículas mediante la pistola aerográfica para que la mezcla aire-talco dure el tiempo suficiente para realizar las pruebas experimentales. Por tal motivo, el desarrollo de un sistema de aspersion de talco que permita la dosificación de las partículas sólidas en la pistola aerográfica es recomendado para corregir el problema de control de succión con la finalidad de obtener una correcta visualización del flujo. Otro aspecto importante es la limpieza de la zona de prueba originado por las partículas para la realización de pruebas posteriores. La limpieza del modelo físico resulta difícil porque hay que limpiar bien todas las paredes del modelo físico quitar el silicón utilizado para sellar las paredes. Una forma de lograr la limpieza del modelo es mediante la inyección de aire limpio con la incorporación de un filtro a la salida del distribuidor de aire como un sistema de pre limpieza. Posteriormente, se sugiere la limpieza de las paredes mediante un trapo limpio hasta que no existan vestigios de talco. Finalmente, se sugiere pulir las paredes del modelo con abrillantador de acrílico para que puedan efectuarse pruebas adicionales. A pesar de los inconvenientes presentados para la

visualización del flujo, esta alternativa tiene la ventaja de no presentar problemas operativos por pérdidas de presión del flujo debido a la alta presión entregada por el compresor y de cambio de fase. Por lo tanto, se recomienda explorar esta opción con mayor detalle para diseñar un sistema de aspersion de partículas que permita visualizar el flujo de manera adecuada.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La construcción del modelo físico permite el desarrollo de experimentos con la finalidad de establecer la base para el estudio de procesos de mezclado por difusión. Esta información planteará esquemas que permitirán el desarrollo de tecnologías enfocadas a mejorar la combustión en llamas difusivas y en el mejoramiento del mezclado de especies por difusión.



Figura 5.1. Unidad generadora de niebla.

Foto tomada al prototipo final de modelo físico acoplado a máquina generadora de niebla, la cual muestra que para llevar a cabo el recalentamiento de fluido de trabajo se tendría que acoplar el turbulador lo cual implicaría un diseño nuevo en el sistema de inyección pero que como se menciona en el capítulo 4 evitaría los problemas de condensación, ya que realizando pruebas con el sistema tal cual se muestra en la figura 5.1 se presentarían inconvenientes tanto de condensación, presión y temperatura que afecten el experimento.



Figura 5.2. Unidad de partículas sólidas.

Foto tomada al prototipo final del modelo físico acoplado a máquina generadora de partículas sólidas que no presenta inconvenientes de condensación ya que al ser una mezcla de aire (gas sobrecalentado) y talco no presenta cambios de fase. Como se indicó en el capítulo 4 el mayor inconveniente de este sistema es su limpieza lo cual lo hace más eficiente que el generador de niebla para realizar el experimento.

5.1. CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas permiten establecer lo siguiente:

1. El control del flujo y las propiedades del fluido son fundamentales para la visualización del flujo.
2. El diseño de un sistema de distribución de partículas que minimice la presencia de zonas de recirculación a la entrada y salida de los inyectores.
3. Minimizar el uso de conexiones del sistema de inyección del fluido al modelo físico con la finalidad de evitar problemas operativos.
4. Considerar la visualización del flujo mediante niebla debido a que los problemas operativos son menores en comparación a la mezcla aire-talco.
5. La implementación de niebla sobrecalentada es una opción viable pero hay que analizar a detalle el problema de pérdida de presión por los accesorios.
6. La opción de visualización con una mezcla aire-partículas se descarta por los problemas operativos en los accesorios, limpieza del modelo y posibles afecciones a la salud.

5.2. RECOMENDACIONES

1. Utilización de la niebla como medio de visualización del flujo.
2. La utilización de niebla requiere mezclarla con aire y que sea impulsada por un mini turbosoplador con finalidad de obtener una presión suficiente para vencer las pérdidas en las conexiones.
3. Planteamiento de un estudio de escalamiento del fenómeno debido a la diferencia de densidades del aire y niebla.
4. No visualizar el flujo en la mezcla aire-talco por sus problemas operativos.

5.3. TRABAJOS FUTUROS

En una etapa próxima se pretende lo siguiente:

1. Desarrollo de un modelo numérico confiable que estudie el proceso de mezcla por difusión molecular.
2. Identificación de los mecanismos relevantes del proceso de mezcla.
3. Visualización de la dispersión de flujos
4. Obtención del campo de velocidades con un equipo de velocimetría de imagen de partículas (PIV).
5. Acoplamiento de una película de agua al modelo físico y numérico de dispersión de chorros por difusión molecular.
6. Realización de experimentos con diferentes velocidades de inyección de las especies.

APÉNDICE 1

Para obtener las distancias óptimas de los tubos, se realizaron los siguientes cálculos¹⁶:

Ecuaciones:

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad \text{Número de Reynolds}$$

$$0.06Re = \frac{Le}{D} \quad \text{Relación para flujos laminares; válido para } <2300 \text{ Re}$$

$$4.4Re^{1/6} = \frac{Le}{D} \quad \text{Relación para flujos turbulentos; válido para } >2300 \text{ Re}$$

Considerando aire como fluido a temperatura ambiente 25°C

$$\rho = 1.19 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\mu = 1.83E-5 \text{ [Pa s]}$$

V [m/s]	Re	Re	L [cm]	L [cm]
	D= 3.3 mm	D=13.3 mm	D= 3.3 mm	D=13.3 mm
1	214.59	864.86	4.24	69.01
2	429.18	1729.72	8.49	138.03
3	643.77	2594.59	12.74	21.69
4	858.36	3459.45	16.99	22.75
5	1072.95	4324.31	21.24	23.62
6	1287.54	5189.18	25.49	24.34
7	1502.13	6054.04	29.74	24.98
8	1716.72	6918.90	33.99	25.54
9	1931.31	7783.77	38.23	26.05
10	2145.9	8648.63	42.48	26.51
11	2360.49	9513.49	53.11	26.93

Tabla 1. Longitud de entrada.

Con base a las propiedades de la densidad y viscosidad dinámica del sistema se modelaron diferentes velocidades con la finalidad de obtener la distancia en la cual el fluido de trabajo esté totalmente desarrollado.

Para este caso particular la velocidad para los inyectores periféricos es de 11 m/s y para el inyector principal es de 3 m/s, con una longitud de 50 cm y 30 cm respectivamente.

APÉNDICE 2

Medición de velocidad por el seguimiento de partículas¹⁷:

Fluido de trabajo	Partícula	Diámetro
Agua	Pliolita	40-200 μm
Agua y agua/glicerina	Poliestireno	10-200 μm
Agua	Esferas de vidrio huecas	25 μm
Agua/glicerina, aceite de silicona	Cera de abeja	0.2-1.0 mm
Agua	Copos de magnesio y aluminio	10-100 μm
Agua, CCl_4	Copos de Kalliroscope	30 μm
CCl_4	Partículas de colorante orgánico	
Agua	Rayos de agua	150-800 μm
Agua	Gotas mezcladas	20-200 μm
Aire	Talco	10 μm
Aire	Licopodio	30 μm
Aire	Esferas de vidrio	20 μm
Aire	Gotas de aceite	1 μm
Aire	Burbujas de Helio	1 μm

Tabla 2. Fluidos de trazado usadas para mediciones de velocidad.

REFERENCIAS

- ¹ H. Reichardt. *On a New Theory of Free Turbulence. Journal of the Royal Aeronautical Society* 47 (1943) 167-176.
- ² Rajaratnam. *Developments in Water Science: Turbulent Jets. 2nd edition, Elsevier* 1976.
- ³ Pani Bidya Sagar. *Turbulent Jets: A Point-Source Method for Hydraulic Engineering. Cambridge University Press India, 1983.*
- ⁴ L. A. Bulis, V. G. Zhivov, and L. P. Yarin. *Low Transition Region in Free Jet. Journal of Engineering Physics* 17 (1996) 239-247.
- ⁵ T. N. Aziz and J. P. Rainford. *Numerical Simulation of Turbulent Jets Engineering. Application of Computational Fluid Mechanics* 2 (2008) 234-243.
- ⁶ E. Faghani and S. N. Rogak. *A phenomenological model of two circular turbulent Jets. International Journal of Engine Research* 14 (2013) 293–304.
- ⁷ Warren D. Seider and Stuart W. Churchill. *Confined Jet Mixing in the Entrance of a Tubular Reactor. AIChE Journal* 17 (1971) 704-712.
- ⁸ D. Adair, M. R. Malin, B. A. Younis. *Calculations of the Concentration Field of a Turbulent Methane Jet. Applied Math. Modelling* 16 (1992) 476-483.
- ⁹ J.X. Wen, L.Y. Huang. *CFD Modelling of Confined Jet Fires Under Ventilation-Controlled Conditions. Fire Safety Journal* 34 (2000) 1-24.
- ¹⁰ J.R. Berg, S.J. Ormiston, H.M. Soliman. *Prediction of the flow structure in a turbulent rectangular free jet. International Communications in Heat and Mass Transfer* 33 (2006) 552–563.
- ¹¹ Juan Manuel Mompó Laborda. *Simulación LES de Flujos Equivalentes a los Chorros Diesel. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, julio 2011.*
- ¹² Luis Cervantes, Eliseo Martínez, William Vicente, Martín Salinas, Georgiy Polupan, Florencio Sánchez, Mauricio De la Cruz. *Análisis Numérico del Proceso de Mezcla Oxígeno-Metano en un Arreglo de Chorros Central-Periférico. XIII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. Instituto Politécnico Nacional, 12-16 Noviembre, 2012.*
- ¹³ Eliseo Martínez, Mauricio de la Cruz, William Vicente, Luis Cervantes, Georgiy Polupan, Martín Salinas, Florencio Sánchez, Ignacio Carvajal. *Estudio Numérico del Efecto de la Presión en el Proceso de Mezcla Metano-Oxígeno en un arreglo de un Chorros 4-Lug Bolt. Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos. Pontificia Universidad Católica de Perú, 21 al 24 de Octubre de 2013, Lima Perú.*
- ¹⁴ Hao Shou and Kefa Cen. *Experimental measurements of a gas–solid jet downstream of a fuel-ric/lean burner with a collision-block-type concentrator, Powder Technology* 170 (2006) 94-107.
- ¹⁵ Wolfgang Merzkirch. *Flow Visualization, Academic Press, second edition, 1987.*
- ¹⁶ Tabla de apéndice 1, Frank M. White, *Mecánica de fluidos, 5 edición.*
- ¹⁷ Tabla de apéndice 2, Flow visualization, *Addition of Foreign Materials into Gaseous and Liquid Flows.*