

ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO DE UN
MICROCOMBUSTOR CILÍNDRICO
MEDIANTE EL MÉTODO DE
ELEMENTOS DE FRONTERA EN DOS
DIMENSIONES

JUAN PABLO MOLINA FLOREZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2014

**ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO DE UN
MICROCOMBUSTOR CILÍNDRICO MEDIANTE
EL MÉTODO DE ELEMENTOS DE FRONTERA
EN DOS DIMENSIONES**

JUAN PABLO MOLINA FLOREZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

MURICIO GIRALDO

Ingeniero Mecánico, Ph.D

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2014

Agradecimientos

El autor desea presentar sus agradecimientos a todas las personas que de una u otra manera han hecho parte de este proceso formativo y han contribuido no solo a la formación académica sino también a la formación personal y profesional. De manera especial, agradezco a mi familia por ser el soporte y la guía en este camino, a Mauricio Giraldo por su apoyo en la dirección de este trabajo y sus enseñanzas en todo ámbito, a Daniel Mejía Parra por su incondicional colaboración y a todos quienes han ayudado a sacar este proyecto adelante.

Resumen

En las siguientes páginas se presenta el análisis fluidodinámico de un microcombustor cilíndrico mediante el método de Elementos de Frontera. De modo general, se analizó el comportamiento de dos corrientes de fluido al interior de un microcombustor con diferentes características internas, mediante el método de Elementos de Frontera y mediante el uso de un software comercial para validar los resultados. Igualmente se realizaron variaciones a la velocidad de entrada de la corriente de combustible para determinar la incidencia de esta variación en el comportamiento de las corrientes al interior.

Inicialmente se presenta un breve marco conceptual y estado del arte con la finalidad de contextualizar al lector en el campo de la generación de micropotencia y sus aplicaciones. Posteriormente se plantea un planteamiento teórico sobre la dinámica de los fluidos y algunas bases sobre las cuales se cimienta el método numérico. Seguidamente se explica la metodología para el desarrollo del trabajo y los resultados obtenidos. Finalmente se enuncian conclusiones y trabajos futuros que puedan surgir a raíz de este.

Para poder realizar las simulaciones utilizando el método de Elementos de Frontera, se hizo uso de un solucionador suministrado por PhD. Mauricio Giraldo y se programó la generación de los diferentes archivos de entrada, al igual que el tratamiento de datos para la graficación de los resultados. Se utilizó un programa de preprocesamiento de datos para generar las mallas que se usaron para la solución del método numérico. Paralelamente se realizó la simulación del fenómeno bajo las mismas condiciones por medio de un software comercial (ANSYS Fluent) para comparar los resultados obtenidos por ambas metodologías.

Por medio de la ejecución del solucionador del método numérico y el postprocesamiento de los datos, se obtuvieron paquetes de gráficas concernientes al fenómeno que sucede al interior de las microcámaras de combustión. Gráficas de geometrías, mallas, contornos de velocidad, campos de velocidad y seguimientos de partículas fueron obtenidas mediante la programación en MATLAB, y de forma similar, se obtuvieron contornos de velocidad para realizar la respectiva comparación.

Índice

1. Microcombustores	14
1.1. Necesidad de microsistemas de potencia	14
1.2. Situación actual de los sistemas de generación y almacenamiento de potencia a pequeña escala	14
1.3. Sistemas de microgeneración	16
1.4. Situación actual de la microcombustión	16
1.5. Microcámaras de combustión	17
2. Conceptos fundamentales de la mecánica de fluidos	24
2.1. ¿Qué es un fluido?	24
2.2. El fluido como medio continuo	24
2.3. Flujo laminar y turbulento	25
2.4. Flujo compresible e incompresible	25
3. Principios de conservación	27
3.1. Principio de conservación de la masa	27
3.2. Principio de conservación del momentum	27
3.3. Ecuaciones gobernantes en forma adimensional	28
3.4. Identidades de Green	28
3.4.1. Primera identidad de Green	29
3.4.2. Segunda identidad de Green	29
3.5. Stokeslet y Stresslet	29
3.6. Formulación directa para fluidos Newtonianos	30
3.7. Trazado de trayectorias	30
4. Metodología de trabajo	32
4.1. Generalidades	32
4.2. Simulación mediante Elementos de Frontera	38
4.2.1. Diseño de geometrías	39
4.2.2. Mallado	40
4.2.3. Ejecución del programa y presentación de resultados	43
4.3. Mediante el uso del software comercial	47
4.3.1. Diseño de geometrías	47
4.3.2. Mallado	48

4.3.3. Solución mediante el módulo Fluent	50
4.3.4. Postprocesamiento	52
5. Análisis fluidodinámico	53
5.1. Microcombustor sin deflectores	53
5.2. Microcombustor con deflector tipo I	59
5.3. Microcombustor con deflector tipo II	65
5.4. Microcombustor con deflector tipo III	71
5.5. Microcombustor con deflector tipo IV	77
5.6. Microcombustor con deflector tipo V	83
6. Conclusiones	90
7. Trabajos futuros	92

Índice de figuras

1.	Energía específica de algunos combustibles y baterías [4]	15
2.	Cámara de combustión para premezcla de aire/combustible [6]	20
3.	Cámara de combustión de flujo anular para premezcla propano/aire [10]	21
4.	Diseño esquemático de la cámara de combustión y el deflector [12] . . .	22
5.	Diseños de microcombustores utilizando deflectores	23
6.	Diseño esquemático del microcombustor a estudiar (sin deflectores) . .	33
7.	Metodología de la simulación por medio de BEM	36
8.	Metodología de la simulación mediante ANSYS Fluent	37
9.	Geometría básica del microcombustor	40
10.	Diferentes configuraciones geométricas de los microcombustores	41
11.	Mallas correspondientes a cada microcombustor modeladas en GiD . .	42
12.	Detalle de <i>inputmesh.txt</i> después de ser exportado en GiD y modificado	44
13.	Diferentes configuraciones geométricas de los microcombustores mode- ladas en ANSYS	49
14.	Mallas correspondientes a cada microcombustor modeladas en ANSYS .	50
15.	Contornos de velocidad en X en microcombustor sin deflectores	54
16.	Campo de velocidad en microcombustor sin deflectores	55
17.	Seguimiento de partícula en microcombustor sin deflectores	56
18.	Contornos de velocidad en X en microcombustor sin deflectores para $V_{combustible} = 500\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	57
19.	Contornos de velocidad en X en microcombustor sin deflectores para $V_{combustible} = 750\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	57
20.	Contornos de velocidad en X en microcombustor sin deflectores para $V_{combustible} = 1000\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	58
21.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo I	60
22.	Campo de velocidad en microcombustor Tipo I	61
23.	Seguimiento de partícula en microcombustor Tipo I	62
24.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo I para $V_{combustible} =$ $500\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	63
25.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo I para $V_{combustible} =$ $750\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	64
26.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo I para $V_{combustible} =$ $1000\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	64

27.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo II	66
28.	Campo de velocidad en microcombustor Tipo II	67
29.	Seguimiento de partícula en microcombustor Tipo II	68
30.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo II para $V_{combustible} = 500\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	69
31.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo II para $V_{combustible} = 750\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	70
32.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo II para $V_{combustible} = 1000\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	70
33.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo III	72
34.	Campo de velocidad en microcombustor Tipo III	73
35.	Seguimiento de partícula en microcombustor Tipo III	74
36.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo III para $V_{combustible} = 500\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	75
37.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo III para $V_{combustible} = 750\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	76
38.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo III para $V_{combustible} = 1000\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	76
39.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo IV	78
40.	Campo de velocidad en microcombustor Tipo IV	79
41.	Seguimiento de partícula en microcombustor Tipo IV	80
42.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo IV para $V_{combustible} = 500\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	81
43.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo IV para $V_{combustible} = 750\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	82
44.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo IV para $V_{combustible} = 1000\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	82
45.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo V	84
46.	Campo de velocidad en microcombustor Tipo V	85
47.	Seguimiento de partícula en microcombustor Tipo V	87
48.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo V para $V_{combustible} = 500\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	88
49.	Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo V para $V_{combustible} = 750\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$	89

50. Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo V para $V_{combustible} = 1000\mu m/s$ y $V_{aire} = 2000\mu m/s$ 89

Índice de tablas

1.	Dimensionamiento del microcombustor y el deflector estudiado por Woodfield [12]	23
2.	Clasificación del flujo de acuerdo al número de <i>Mach</i>	26
3.	Propiedades del fluido	33
4.	Condiciones de frontera	34
5.	Parámetros para la simulación	35
6.	Variación de la velocidad para las diferentes simulaciones	35
7.	Número de nodos y elementos para cada microcombustor modelado mediante GiD	42
8.	Número de nodos y elementos para cada microcombustor modelado mediante ANSYS	51

Introducción

Cada vez es más común escuchar sobre micro sistemas electro-mecánicos (MEMS, por su sigla en inglés), los cuales vienen siendo utilizados ampliamente en diferentes áreas de la ingeniería como la nanotecnología, sensores, microactuadores e inclusive sistemas de generación de potencia. Esta tendencia está fundada en el hecho que mediante estos sistemas es posible alcanzar un incremento significativo en las eficiencias cuando se trabaja en escalas del orden de micrómetros o inferiores. En este sentido, los desarrollos tecnológicos han estado encaminados hacia dos áreas principales: los métodos de manufactura en escalas micro y nanométricas, y en la comprensión y control de los fenómenos que suceden en dichos dispositivos.

Tal es el caso de los microcombustores (cámaras de combustión a escala micrométrica), los cuales se han perfilado como una solución efectiva a los diferentes problemas que presentan los dispositivos de almacenamiento de energía actuales: las baterías, dado que aún bajo condiciones poco eficientes de combustión, superan en creces la cantidad de energía disponible por unidad de masa.

Un beneficio adicional que se consigue al reducir el tamaño de los microreactores, es que se consigue minimizar variables tales como impacto ambiental, pérdida de energía, gases producto de la combustión incompleta, entre otros, así como maximizar la transformación de energía y la temperatura al interior de la cámara de combustión, los cuales son deseables para aumentar la eficiencia de los mismos. Hay gran cantidad de variables involucradas en el estudio de las unidades de microcombustión, sin embargo en nuestro caso algunos parámetros tales como tamaño, combustible a utilizar, material, espesor de pared, entre otros serán tomados como fijos a partir de información de la literatura para enfocarnos en los parámetros fluidodinámicos.

Determinar si bajo ciertos parámetros fluidodinámicos se podría obtener una combustión eficiente (perfiles de velocidad, presiones de entrada/salida, relación aire y combustible, etc.) es importante dentro del estudio fluidodinámico de las micro-cámaras de combustión y se convierte en el problema a resolver en este estudio. La forma más adecuada para encontrar los parámetros óptimos es sin lugar a duda la simulación, puesto que gracias a los avances tecnológicos en computación se pueden recrear cada uno de los escenarios para determinar qué condiciones generan la combustión más eficiente, sin

incurrir en los altos costos asociados no solo a la fabricación de los dispositivos, sino a la medición de variables en esta escala.

En la actualidad los microcombustores han atraído la atención de los investigadores y la comunidad científica en tanto representan una fuente de potencia portátil, ideal para pequeños elementos electrónicos como aeromodelos, robots y actuadores en general. Aún bajo condiciones de poca eficiencia, los microcombustores (ya sea de hidrógeno, propano o gas natural) superan a las baterías actuales en términos de energía por unidad de masa, lo cual los hace atractivos para diferentes tipos de aplicaciones en los cuales se desean equipos de poco tamaño y peso pero que presenten gran rendimiento.

Ahora bien, si se lograra alcanzar eficiencias altas en el proceso dentro de la cámara de combustión, se estaría transformando mayor cantidad de energía química en térmica, lo cual es deseable. Analizar la influencia de algunas variables no sólo ayuda a mejorar esta eficiencia, sino también ayuda a minimizar los gases producto de la combustión incompleta que son bastante nocivos para la atmósfera, además de minimizar los costos nominales de operación.

Para poder aumentar la eficiencia de estos dispositivos es necesario realizar un estudio fluidodinámico y así poder determinar las variables más importantes y la influencia que tienen en el desempeño de los microcombustores. Se hace necesario entonces, el uso de herramientas de simulación para determinar de manera eficiente estos parámetros. Esto facilita no solo la búsqueda de los mismos, sino también, un estudio más detallado del comportamiento de los fluidos dentro del microcombustor. Adicionalmente, la simulación es una buena herramienta puesto que es menos costosa que la construcción de los microcombustores y la medición de los parámetros de manera experimental. Por medio de la simulación es posible analizar el comportamiento de los microcombustores y realizar análisis de sensibilidad sobre sus variables, y de igual manera sus resultados y métodos quedan a disposición para futuras investigaciones.

La solución de los problemas explicados anteriormente se planteó mediante el cumplimiento de ciertos objetivos, teniendo como fin global la evaluación del comportamiento fluidodinámico de un sistema de microcombustión de aire y gas natural mediante el método de Elementos de Frontera, buscando las condiciones que favorecen la eficiencia de la combustión y verificando la congruencia de la solución con otro método numérico

aplicable a la dinámica de fluidos.

Para la consecución de este fin, se hace precisa la simulación por medio del método de Elementos de Frontera la interacción de las corrientes de aire y de combustible al interior de la cámara de combustión, a escala micrométrica. Establecer los parámetros fluidodinámicos involucrados en las simulaciones, con los cuales se da una combustión eficiente, es también deseado.

Para verificar la congruencia de la solución mediante el método de Elementos de Frontera con la realidad física, y dados los impedimentos de tipo económico para realizar pruebas experimentales, se simularon algunas de las geometrías con otros métodos numéricos utilizados en la dinámica de fluidos, por medio de software comercial.

1. Microcombustores

1.1. Necesidad de microsistemas de potencia

La idea de desarrollar equipos para la generación de potencia (tanto eléctrica como mecánica) a menor escala es cada día mayor, y de igual manera se necesitan elementos que sean capaces de satisfacer estas demandas, pero conservando las mismas características de escala e incluyendo reducciones de peso y volumen, mientras que su vida útil sea incrementada. De manera similar, las tendencias aceleradas hacia la miniaturización de los dispositivos han obligado a los científicos a desarrollar métodos de manufactura para elementos de estas dimensiones, y tecnologías en pro de estas ventajas. Es aquí cuando los equipos capaces de generar micro-potencia (mili-watts a watts) se presentan ante el mundo como una solución efectiva y eficiente ante los demandas anteriormente descritas [1]. Tal como indican Chia y Feng [2], a pesar de los rápidos avances en la miniaturización de los aparatos, tanto de uso militar como civil, la constante que ha retrasado un poco su avance son los sistemas de suministro de potencia disponibles. Esto debido a que en la mayoría de los casos, los subsistemas encargados de la producción y el suministro de la energía ocupan una gran proporción de la masa y el volumen dentro de los sistemas en los cuales se encuentran vinculados. Es así como se crea la necesidad de estudiar y desarrollar micro fuentes de potencia y los hidrocarburos se perfilan como una opción razonable que ofrece suficientes ventajas competitivas.

A pesar de que el campo de la micro-generación de potencia es aún un campo joven y en el cual la mayoría de estudios se enfocan en su factibilidad, representa una fuente de desarrollo tecnológico que mejoraría considerablemente la eficiencia de muchos artefactos de consumo masivo que utilizan diferentes fuentes para la generación y almacenamiento de energía [3].

1.2. Situación actual de los sistemas de generación y almacenamiento de potencia a pequeña escala

La tecnología predominante actualmente en lo que respecta al almacenamiento de potencia para dispositivos de pequeña o micro escala son las baterías, sin embargo su uso tiene algunas grandes desventajas como el alto impacto ambiental y el alto costo [2]. Es sabido que el proceso de la combustión es una buena fuente de generación de

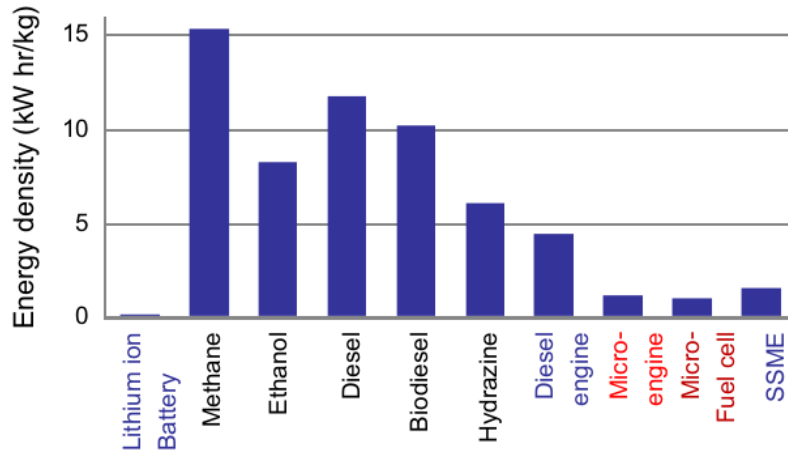


Figura 1: Energía específica de algunos combustibles y baterías [4]

potencia eléctrica o mecánica, y que aún sus ventajas sobre las tecnologías químicas de las baterías son inmensas. Por este motivo, desde hace algunos años se viene pensando en la posibilidad de generar potencia a partir de pequeñas cámaras de combustión, utilizando combustibles como hidrocarburos líquidos y gaseosos.

La razón por la que resultan ser una buena estrategia es debido a la gran densidad energética que tienen los hidrocarburos comparados con la relativa baja densidad energética que poseen las baterías que se utilizan actualmente. Mientras que una batería de Litio de las que se encuentra disponible en el mercado posee una densidad energética de 1.2 MJ/kg y una batería alcalina posee una densidad energética de 0.6 MJ/kg, los hidrocarburos líquidos tienen densidades energéticas que típicamente oscilan alrededor de 45 MJ/kg [1]. En la figura 1 se puede observar la ventaja energética que representan algunos hidrocarburos con respecto a algunas baterías.

Por motivos como los anteriores, se ha pensado en el diseño de micro-cámaras de combustión a partir de las cuales se pueda aprovechar la energía térmica liberada para convertirla en energía mecánica o eléctrica, obteniendo beneficios en mayores proporciones a los que pueden producir los sistemas actuales.

1.3. Sistemas de microgeneración

Según lo expresado por Chia y Feng [2], los avances tecnológicos en materia de generación de potencia a pequeña escala han dado pie a micro-sistemas destinados a cumplir con este objetivo. Muchos de ellos, utilizando pequeñas cámaras de combustión. Algunos de los sistemas más típicos, de los cuales se tienen estudios experimentales y de simulación corresponden a:

- Micro-turbinas de gas y micro-motores rotativos
- Micro-sistemas termoeléctricos
- Micro-celdas de combustible
- Micro-sistemas electromagnéticos
- Micro-sistemas termo-fotovoltaicos

Las micro-turbinas de gas y micro-motores rotativos, los micro-sistemas termoeléctricos y los micro-sistemas termo-fotovoltaicos son los sistemas más comunes en los cuales se utilizan microcombustores para la generación y el almacenamiento de energía, cubriendo una gran cantidad de aplicaciones en las cuales se demanda relativa-alta potencia (1–50 W) y otros con demanda de potencia inferiores (1 mW). Aplicaciones potenciales en electrónica personal (celulares y computadoras), así como sensores y actuadores, equipos aéreos y aeroespaciales, equipamiento militar y de seguridad, micro-turbomáquinas y en el sector automovilístico están siendo estudiados para su desarrollo [2].

Dado que la mayoría de micro-sistemas de generación y almacenamiento de potencia utilizan una cámara de combustión, este elemento se convierte en parte crítica de los sistemas y en el fundamento de los estudios recientes; adicionalmente de ella depende en gran cantidad la eficiencia total del sistema [5]. A raíz de esto, gran cantidad de estudios y experimentos se han realizado para determinar las características más importantes y las diferentes variables de diseño que influyen en los parámetros de flujo y el comportamiento de los fenómenos térmicos y fluidodinámicos al interior de las mismas.

1.4. Situación actual de la microcombustión

Inicialmente, los primeros trabajos sobre microcombustión establecían que era imposible la propagación de la llama en espacios tan pequeños, sin embargo experimentos

posteriores demostraron que era posible a escala micrométrica [6]. Tal como lo afirma Fernández-Pello [1], el fenómeno de la combustión a escala micro presenta algunos problemas, la mayoría relacionados con el tiempo disponible para que los reactantes reaccionen al interior de la cámara, así como la posible extinción de la llama por efectos de reacciones en la pared o superficie del microcombustor. En el primer caso, es necesario que el tiempo disponible para la reacción de combustión (tiempo de residencia) sea mayor que el tiempo requerido para que la combustión tenga lugar (tiempo de combustión). Cuando el tiempo de residencia es insuficiente, es decir menor que el tiempo de combustión, la llama se extinguirá debido a la combustión incompleta [1, 4]. En lo que respecta a las reacciones en la pared, la extinción de la llama podría darse debido a problemas térmicos o de radicales. El fenómeno de extinción térmica se produce cuando la pérdida de calor a través de la pared hacia el ambiente es muy alta y por ende la combustión no alcanza niveles de estabilidad. Por otro lado, la extinción por radicales se produce debido a la absorción de las especies en la pared y su subsecuente recombinación, lo cual se traduce en una falta de homogeneidad química [1, 6]. A medida que se reduce el tamaño del combustor, la relación entre su volumen y su área superficial incrementa de manera exorbitante, produciendo fuertes acoples térmicos y químicos entre la llama, la interfaz llama-superficie y la estructura del combustor. Variando las condiciones de operación es posible controlar algunos de estos parámetros y evitar la extinción de la llama [4].

1.5. Microcámaras de combustión

El estudio de los micro-combustores ha tenido dos ejes centrales a través de su desarrollo: el primero, los métodos de manufactura necesarios para su fabricación, y el segundo es la comprensión y el control de los fenómenos y las variables principales que afectan su funcionamiento y eficiencia, a escala micro. Con respecto a los métodos de manufactura de precisión a pequeña escala, y sin la idea de ahondar mucho en ellos, la literatura resalta la manufactura de electro-descarga (EDM, por sus siglas en inglés), manufactura por rayo láser (LBM) y la manufactura por concentración de rayos iónicos (FIBM) como los métodos más utilizados y adecuados para la fabricación de este tipo de sistemas. Adicionalmente estos métodos han venido siendo usados frecuentemente para la fabricación de MEMS, así como los sistemas de prototipado rápido y las técnicas de manufactura de lotes [1]. Los materiales utilizados para la fabricación de la mayoría de estos dispositivos son materiales que van desde metales, fabricados bajo técnicas de

manufactura tradicionales o técnicas de fundición, hasta materiales compuestos a base de silicio, fabricados por las técnicas descritas anteriormente [2, 7].

Varios trabajos se han desarrollado alrededor de la comprensión de los fenómenos que ocurren al interior de las micro-cámaras de combustión, tanto de forma experimental como a través de la simulación. Yang y Chou [5] realizaron experimentos para evaluar la temperatura de salida de un microcombustor cilíndrico utilizando hidrógeno (H_2) como combustible, variando parámetros geométricos y fluidodinámicos como la longitud de los mismos, la presencia de una ampliación de la cámara para la expansión del gas (backward facing step), la relación aire/combustible y las velocidades de admisión de la pre-mezcla. Después de verificar que la combustión estable es posible de alcanzar en los micro-dispositivos, obtuvieron los perfiles de temperatura a la salida de cada uno de los microcombustores y concluyeron que la ampliación de la cámara de combustión para que el gas se expanda es útil en la medida que facilita el proceso de mezclado del combustible y prolonga el tiempo de residencia. Igualmente, establecieron que hay una relación entre la velocidad de flujo y la relación aire/combustible, que debe ser seleccionada adecuadamente para alcanzar combustión estable y los perfiles de temperatura más elevados a la salida de los microcombustores. Analizando los patrones de temperatura obtenidos al final de toda la etapa de experimentación, Yang y Chou describen el escenario de la combustión en dos partes: la primera como la combustión cerca a la pared debido a la expansión del gas, y la segunda como la combustión en la región central a la salida del microcombustor, la cual se genera por los gases calientes producto de la combustión en la cercanía de las paredes. En algunos casos obtienen temperaturas uniformes a la salida superiores a los 1000 K [5].

Ingenieros del Departamento de Aeronáutica y Astronáutica del MIT han desarrollado una micro-turbina de gas capaz de otorgar entre 10 y 50 W de potencia eléctrica en un volumen inferior a un centímetro cúbico [7]. Centrados en el desarrollo de la unidad de micro-combustión, Mehra [7] estudió los efectos de los tiempos de combustión del hidrógeno en la micro-turbina, así como los fenómenos de la combustión a escala micro. Igualmente, determinan la relación existente entre la eficiencia de la combustión y el número de Damkohler al interior de la cámara.

Bajo las condiciones de diseño planteadas por Mehra y el equipo del MIT, el microcombustor de 0.195 cm³ exhibe gases de salida a temperaturas mayores a los 1600 K y

eficiencias de la combustión de hasta 95 %. A pesar de que la micro-turbina es diseñada para operar con hidrógeno, también realizan pruebas a la estructura mediante la combustión de etileno/aire y propano/aire [7].

Debido a que los costos asociados a la fabricación de equipos de tan pequeñas dimensiones son muy elevados, muchos estudios se han encaminado por las vías de la simulación CFD, puesto que gracias a las herramientas matemáticas y a los avances recientes en computación, se pueden obtener resultados muy certeros a costos mucho menos elevados que si se recurre a los métodos de maquinado descritos anteriormente. Tal es el caso de Hua y Wu [6], quienes realizaron simulaciones CFD para estudiar el fenómeno de la combustión de hidrógeno y aire en una serie de micro-combustores, variando sus dimensiones desde escala mili a escala micro. Los efectos de la combustión de la premezcla de aire y combustible al interior del micro-combustor fue estudiada con la finalidad de determinar los efectos de diversos materiales con diferentes coeficientes de conductividad térmica y analizar las pérdidas de calor hacia el ambiente. La cinética de la reacción química entre el hidrógeno y el aire fue estudiada con la finalidad de simular la combustión dentro de la micro-cámara. Los diámetros de entrada son reducidos desde 0.4 mm hasta 0.05 mm. Debido a que las dimensiones son reducidas notablemente, las cámaras de combustión estudiadas sufren un crecimiento exagerado de la relación entre el área superficial y el volumen, haciendo que el tiempo de residencia de la mezcla sea menor, trayendo consigo un problema que se ve reflejado en una combustión incompleta al interior de la cámara [6].

Las simulaciones realizadas reflejan que cuando la eficiencia de la combustión no es lo suficientemente alta, no habrá suficiente generación de calor al interior de la cámara y la llama podría extinguirse. Adicionalmente, las simulaciones realizadas bajo condiciones adiabáticas indican que la combustión puede ser estable sólo cuando el tamaño de la cámara de combustión es lo suficientemente grande comparado con el espesor de llama adiabática. La extinción de la llama puede producirse cuando las dimensiones del micro-combustor son muy pequeñas o cuando el coeficiente de transferencia de calor en las paredes exteriores es muy alto, debido a las pérdidas excesivas de calor hacia el exterior. Sin embargo, el uso de materiales con bajo coeficiente de transferencia de calor puede mantener la estabilidad de la combustión puesto que reduce las pérdidas de calor hacia el exterior [6].

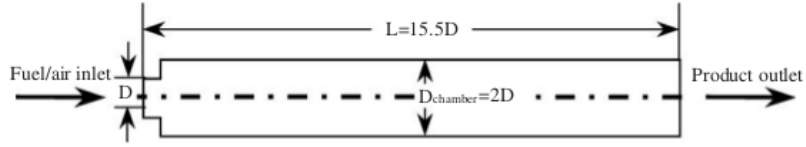


Figura 2: Cámara de combustión para premezcla de aire/combustible [6]

Con la finalidad de comprender más a fondo la dinámica de los fenómenos que suceden al interior de la micro-turbina desarrollada por el MIT [7], Hua y Wu [8] realizaron simulaciones CFD para analizar la dinámica de los fluidos a su interior así como el mecanismo de transferencia de calor dentro de la cámara de combustión y las pérdidas de calor hacia el ambiente. De igual manera, se evalúa el comportamiento térmico variando las condiciones de operación: relación aire/combustible, flujo másico y condiciones en la frontera. Las simulaciones indican que para diversas condiciones de flujo másico y relaciones de combustible/aire, la llama puede extinguirse (relaciones bajas) o puede incluso haber combustión aguas arriba de la boquilla de entrada de fluido (relaciones altas). En algunos casos, se utilizan recubrimientos catalíticos al interior de las paredes de los microcombustores para evitar problemas con la combustión [9]. Experimentos realizados sobre otro tipo de microcombustores cilíndricos de flujo anular (diámetro interno de 18.5 mm y altura de 3.5 mm) indican que por lo general la región en la cual la llama es estable es lo suficientemente amplia y que se pueden alcanzar eficiencias de la combustión de hasta 99.4 % cuando las relaciones combustible/aire oscilan entre 0.5 y 0.7 (utilizando propano como combustible y un catalizador) y el flujo másico corresponde a 0.06 g/s [10]. Al utilizar recubrimiento catalítico al interior del microcombustor (película de Pt) se observa una combinación entre las reacciones de combustión catalítica y por fase gaseosa, con un aumento en la eficiencia de la combustión para rangos más amplios de relaciones combustible/aire. A pesar de esto, cuando se utiliza una placa porosa impregnada de platino, se evidencia combustión catalítica pero sin mayores mejoras en las características de la combustión.

En la figura 2 se observa la geometría de la micro-cámara de combustión estudiada por Hua y Wu, así como por la mayoría de trabajos relacionados (aunque con dimensiones diferentes) [2, 5]. Por su parte, en la figura 3 se observa el diseño de la cámara de combustión de flujo anular estudiada por Sakurai y Yuasa [10]. Todos los trabajos descritos hasta este momento presentan la particularidad de que el fluido de trabajo, a pesar de ser hidrógeno en algunos [6, 11] y propano en otros [10], siempre ingresa a la

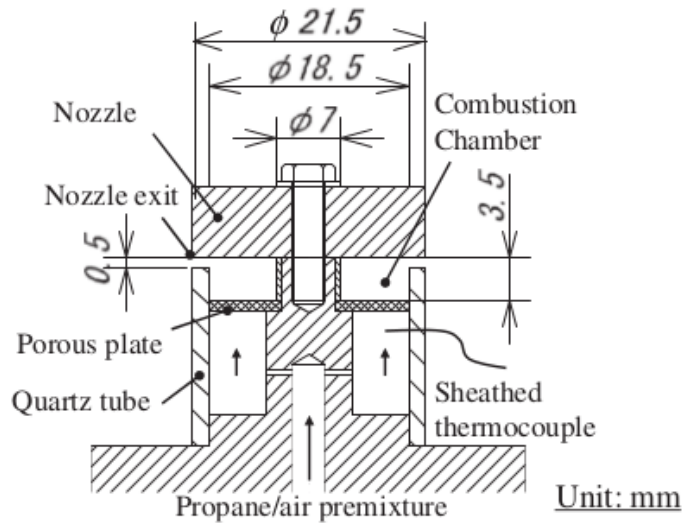


Figura 3: Cámara de combustión de flujo anular para premezcla propano/aire [10]

cámara de combustión como una premezcla, lo cual garantiza las condiciones de interacción necesarias entre las moléculas de combustible y comburente para que se lleve a cabo el proceso de la combustión [5]. Sin embargo, esa no es la única forma en la cual estas sustancias pueden ingresar a la cámara de combustión.

Woodfield y Nakabe [12] estudiaron otro sistema de micro-combustión que no implica el ingreso del combustible y el comburente como una premezcla, sino que por el contrario permite realizar el ingreso de ambos por medio de un plato con múltiples agujeros (baffle plate) por medio del cual se genera un anillo de oxidante mediante múltiples flujos de aire alrededor de un único flujo de combustible, de forma paralela al eje de la cámara de combustión. La figura 4 presenta un diseño esquemático del deflector estudiado por Woodfield y Nakabe.

Los estudios realizados al comportamiento fluidodinámico del deflector encuentran que comparado con las cámaras de combustión coaxiales, hay un mejoramiento contundente en el efecto de mezcla de ambos fluidos, siempre y cuando se tenga un flujo isotérmico y de densidad constante. Igualmente, pequeños cambios en la geometría del deflector pueden generar el mejoramiento de la mezcla en caso de flujos muy laminares. Con motivo de aumentar la razón de mezcla, afirma Woodfield [12] que es deseable reducir la velocidad de la corriente de combustible, y una buena forma de hacerlo es

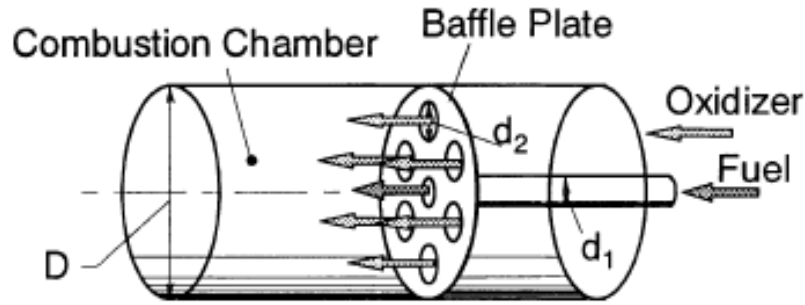


Figura 4: Diseño esquemático de la cámara de combustión y el deflector [12]

aumentar el diámetro del agujero por el cual hace el ingreso a la cámara de combustión; de manera análoga puede aumentarse la velocidad del agente oxidante por medio de la reducción del diámetro de los agujeros por los cuales ingresan a la micro-cámara [12]. Para obtener ventajas en la mezcla de estos dos agentes, se sugiere que la ubicación de los agujeros por los cuales ingresa el agente oxidante estén lo más cerca posible a las paredes de la cámara de combustión; sin embargo, trabajos similares sugieren que en el rango entre $0 < Re < 200$, lo ideal es que estos agujeros se encuentren a la mitad entre el eje del deflector y las paredes del microcombustor [13].

Así mismo, B. Moghtaderi [13, 14] realizó estudios sobre un microcombustor con deflector utilizando metano como combustible. Sus resultados indicaron que el mejoramiento del efecto de mezcla en los microcombustores con deflector incrementa la tasa de conversión del metano tanto en reacción catalítica como sin agente catalizador, presentando alguna ganancia mayor bajo la presencia de catalizador. Los experimentos conducidos por Moghtaderi indican que bajo las condiciones descritas, el Rodio (Rh) es el mejor catalizador para este tipo de micro-sistemas, seguido por el uso de Níquel (Ni). Similarmente, los perfiles de temperatura alrededor del eje de la micro-cámara de combustión demostraron no ser uniformes y con presencia de algunos puntos calientes cerca al tubo de ingreso de combustible. Cuando se aumenta la presión de entrada, la conversión del metano se reduce. En la figura 5a se observa el dimensionamiento de la micro-cámara de combustión estudiada por Woodfield et al, así como la tabla 1 muestra los parámetros para su dimensionamiento. La figura 5b ilustra el dimensionamiento que B. Moghtaderi realiza para llevar a cabo sus experimentos sobre la micro-cámara de combustión.

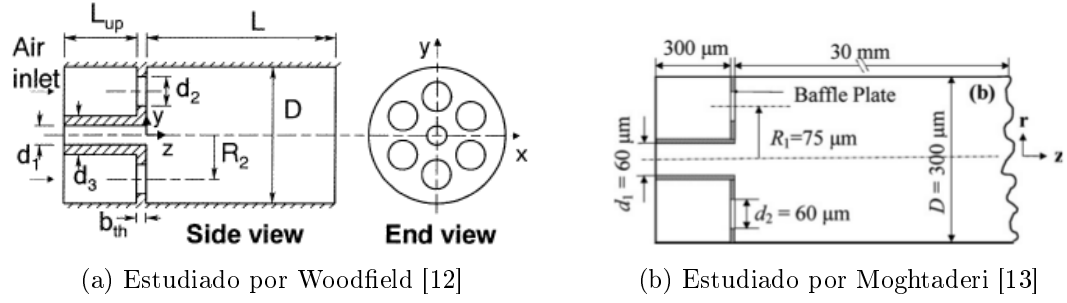


Figura 5: Diseños de microcombustores utilizando deflectores

d_1/D	d_2/D	R_2/D	b_{th}/D	d_3/D	L/D	L_{up}/D	Re_D	m_1/m_2
0.182	0.182	0.341	0.05	0.282	15	1	100	0.0488

Tabla 1: Dimensionamiento del microcombustor y el deflector estudiado por Woodfield [12]

Estudios experimentales realizados sobre diferentes tipos de microcombustores indican que el deflector produce una vorticidad intensa y mejora la mezcla del aire y el combustible (que en su caso fue metano) aún para bajos números de Reynolds [15]. Por su parte, otros estudios demuestran que la mezcla es afectada en grandes cantidades debido a las regiones de recirculación cercanas a la pared que se forman entre los flujos que ingresan a la cámara. De igual manera, la aparición de la región central de recirculación es importante en la medida que fomenta la mezcla turbulenta entre el combustible y los oxidantes, transportando el combustible hacia el flujo de oxidante o haciendo que este se inserte dentro del flujo de combustible [16].

2. Conceptos fundamentales de la mecánica de fluidos

2.1. ¿Qué es un fluido?

Encontrar una definición técnica de lo que es un fluido puede ser tarea ardua, pero su condición física podría explicarse a partir de la reacción que tiene el fluido cuando es sometido a los efectos de un esfuerzo cortante, dado que este se deforma continuamente; contrario a lo que le sucede a un cuerpo sólido, que sufre una deformación estática y por lo general regresa a su forma original, a menos de que se haya producido una deformación plástica. Cualquier esfuerzo cortante aplicado a un fluido newtoniano, no importa que tan pequeño sea, provoca el movimiento del fluido hasta que el esfuerzo se retire.

Según la definición anterior, es posible clasificar los fluidos como *líquidos*, *vapores* y *gases*. Las diferencias entre estos estados corresponden a las fuerzas cohesivas que interactúan entre sí y la coexistencia de mezclas bifásicas, en el caso específico de los *vapores*. A pesar de que existen diferencias significativas entre líquidos, vapores y gases, todos obedecen las mismas leyes de movimiento y por tanto son considerados fluidos.

2.2. El fluido como medio continuo

En la mecánica de fluidos, se asume como condición inicial que los fluidos son medios continuos; es decir, las propiedades del fluido (presión, densidad, velocidad, volumen específico, etc.) presentan una variación homogénea a lo largo del fluido y pueden ser medidas en cualquier punto de este. Por ende, pueden considerarse como variables continuas en el espacio.

Los fluidos están constituidos por moléculas, que a su vez están constituidas por átomos. Dada esta condición sería posible asumir un análisis molecular (e inclusive atómico) sobre el dominio, que conlleve a resultados muy precisos. Sin embargo esta situación no es práctica en la mayoría de casos vistos desde una perspectiva ingenieril, debido a que el esfuerzo que se debería hacer para solucionar este tipo de problemas sería considerablemente grande comparado con el que se debería hacer para solucionar la misma situación considerando la premisa de medio continuo, obteniendo en ambos casos resultados similares.

2.3. Flujo laminar y turbulento

El *número de Reynolds* es un parámetro adimensional que determina si el comportamiento de un fluido se encuentra gobernado por un modelo laminar, turbulento o si se encuentra en una fase de transición. Este número puede calcularse mediante la ecuación (1).

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu}, \quad (1)$$

Donde ρ corresponde a la densidad del fluido, V y L corresponden respectivamente a la velocidad y longitud características del flujo y μ es la viscosidad absoluta. La expresión $\frac{\mu}{\rho}$ es también conocida como *viscosidad cinemática*, ν .

Valores muy pequeños del número de Reynolds indican que se trata de un flujo laminar, caracterizado porque el fluido fluye en aparente orden, en forma de capas o láminas, y las líneas de corriente con las que se representa el flujo no se cruzan entre sí. Es un régimen de flujo caracterizado por la influencia de la viscosidad y los gradientes de presión, debido a que efectos inerciales pueden ser ignorados gracias a las bajas velocidades.

Valores altos del número de Reynolds suelen estar asociados a un flujo turbulento, caracterizado por cierta aleatoriedad en la forma de flujo del fluido e inestabilidad en las trayectorias que siguen sus líneas de corriente. Este tipo de flujo es muy común pero de difícil representar analíticamente.

2.4. Flujo compresible e incompresible

La compresibilidad de un fluido se refiere a los cambios significativos en el volumen a medida que se aplican diferenciales de presión. Sin embargo, esta propiedad está más referida al cambio en la densidad del fluido. De tal manera que un fluido es compresible siempre que los cambios en la densidad sean significativos cuando se aplique una diferencia de presión. De manera análoga, se considera que el fluido es incompresible cuando el cambio en la presión sobre el fluido no tiene efectos considerables en la variación de la densidad del fluido. Los sólidos son considerados incompresibles, debido a que los átomos se encuentran muy próximos unos a otros, lo cual evita que se de un desplazamiento libre al interior de la estructura molecular sin que aparezcan fuerzas de repulsión grandes. Por su parte los líquidos presentan espacios libres más grandes

$Ma < 0.3$	<i>flujo incompresible</i> . Los efectos de la densidad son despreciables
$0.3 < Ma < 0.8$	<i>flujo subsónico</i> . Los efectos de la densidad son importantes, pero no aparecen ondas de choque
$0.8 < Ma < 1.2$	<i>flujo transónico</i> . Aparecen ondas de choque que separan regiones subsónicas y supersónicas dentro del flujo
$1.2 < Ma < 3.0$	<i>flujo supersónico</i> . Hay ondas de choque pero ya no hay regiones subsónicas
$3.0 < Ma$	<i>flujo hipersónico</i> . Ondas de choque y otros cambios que experimenta el fluido son especialmente fuertes

Tabla 2: Clasificación del flujo de acuerdo al número de *Mach*

entre sus moléculas, lo cual facilita el desplazamiento de las mismas en presencia de una fuerza, sin embargo son considerados, bajo condiciones normales de presión y temperatura, como fluidos incompresibles. Los gases, a diferencia de los anteriores, poseen mucha libertad para el desplazamiento a nivel molecular, lo cual los hace sensibles a las variaciones de densidad cuando hay diferencias de presión. Por este motivo, bajo condiciones normales de presión y temperatura son considerados sustancias compresibles.

En el análisis de flujos compresibles, el número de *Mach* es el parámetro de mayor interés, puesto que a partir del valor de este se puede clasificar el tipo de flujo y por ende la incidencia de la densidad en las características del mismo.

El número de *Mach* se calcula como lo indica la ecuación (2):

$$Ma = \frac{U}{a}, \quad (2)$$

Donde *Ma* representa el número de *Mach*, *U* es la velocidad del flujo y *a* se refiere a la velocidad del sonido en el fluido estudiado. La clasificación presentada en el cuadro 2 es muy común dentro del estudio de la aerodinámica:

Para los casos en los cuales el número de Mach es menor que 0.3, es posible considerar el fluido como incompresible, lo cual acarrea simplificaciones considerables al modelo puesto que la densidad puede considerarse como constante a lo largo del flujo del fluido.

3. Principios de conservación

La gran mayoría de los problemas que implican flujo de fluidos son analizados a partir de un enfoque euleriano, el cual considera un volumen o punto definido en el espacio, utilizado para la deducción de las ecuaciones que expresan los cambios de masa, momentum y energía que pasa a través de él. A partir de la definición de este volumen de control es posible deducir las ecuaciones que rigen el comportamiento de los fluidos, planteando respectivamente balances de masa, momentum y energía.

3.1. Principio de conservación de la masa

El principio de conservación de la masa en estado estacionario para un fluido newtoniano, también conocido como ecuación de continuidad, corresponde al balance de la masa que entra y sale de un volumen diferencial de fluido. Este balance es expresado mediante la ecuación (3):

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

Donde \vec{u} es la velocidad y ρ es la densidad.

3.2. Principio de conservación del momentum

Por su parte, el balance de las fuerzas superficiales y fuerzas de cuerpo (incluyendo las fuerzas de inercia, las fuerzas viscosas y las presiones) sobre un volumen diferencial de fluido, puede ser representado mediante la ecuación (4):

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

Donde \vec{u} es la velocidad, ρ es la densidad, p es la presión, μ es la viscosidad y g es la gravedad.

3.3. Ecuaciones gobernantes en forma adimensional

Es posible escribir de una manera más sencilla el sistema que representa el flujo de un fluido incompresible, de una forma adimensional, tal como lo expresan las ecuaciones (5) y (6):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$Reu_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}, \quad (6)$$

En el caso en que las fuerzas de inercia (ρVL) son considerablemente más pequeñas en magnitud que las fuerzas viscosas, el número de Reynolds se reduce considerablemente, obteniendo valores inferiores a 1. Esto sucede normalmente cuando el sistema es demasiado pequeño, se manejan bajas velocidades o los fluidos con los que se está trabajando son considerablemente viscosos. En estos casos el sistema de ecuaciones de Navier-Stokes puede ser reducido al sistema de ecuaciones de Stokes, descrito en las ecuaciones (7) y (8):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (8)$$

donde

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (9)$$

3.4. Identidades de Green

La formulación del sistema de ecuaciones de Stokes presentada en 7, 8 y 9 hace referencia a un sistema de ecuaciones gobernantes lineal, lo cual es requerido para poder desarrollar una formulación integral de frontera. En este caso, se utilizan las identidades de Green para construir la formulación integral directa para los fluidos Newtonianos.

Se hace necesario entonces la definición de un campo de flujo auxiliar ($\vec{v}(x, y), q(x, y)$) para el trabajo con las identidades de Green.

3.4.1. Primera identidad de Green

A continuación se presenta la primera identidad de Green para flujo Stokes:

$$\int_{\Omega} \left(\mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial y_j \partial y_j} - \frac{\partial q}{\partial y_i} \right) u_i d\Omega_y = - \int_{\Omega} \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial y_k} + \frac{\partial u_k}{\partial y_i} \right) \left(\frac{\partial v_i}{\partial y_k} + \frac{\partial v_k}{\partial y_i} \right) d\Omega_y + \int_S \sigma_{ik}(\vec{v}, q) u_i n_k dS_y, \quad (10)$$

donde $\vec{n}(x)$ es el vector normal a la superficie.

3.4.2. Segunda identidad de Green

A continuación se presenta la segunda identidad de Green para flujo Stokes:

$$\int_{\Omega} \left[\left(\mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial y_j \partial y_j} - \frac{\partial p}{\partial y_i} \right) v_i - \left(\mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial y_j \partial y_j} - \frac{\partial q}{\partial y_i} \right) u_i \right] d\Omega_y = \int_s [\sigma_{ik}(\vec{u}, p) v_i n_k - \sigma_{ik}(\vec{v}, q) u_i n_k] dS_y, \quad (11)$$

3.5. Stokeslet y Stresslet

La solución fundamental singular del sistema de ecuaciones de Stokes es conocida como Stokeslet. Esta se caracteriza porque encuentra una solución para:

$$\mu \frac{\partial^2 u_k^i(x, y)}{\partial y_j \partial y_j} + \frac{\partial q^k(x, y)}{\partial y_i} = \Delta(x, y), \quad (12)$$

donde

$$\Delta(x, y) = \begin{cases} 1 & x = y \\ 0 & x \neq y \end{cases}$$

Para el caso bidimensional, el Stokeslet está dado por:

$$u_i^j(x, y) = -\frac{1}{4\pi} \left[\ln \left(\frac{1}{r} \right) \delta_{ij} + \frac{(x_i - y_i)(x_j - y_j)}{r^2} \right], \quad (13)$$

Mientras que la presión correspondiente está dada por:

$$q^k(x, y) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\ln \frac{1}{r} \right), \quad (14)$$

donde r es la distancia euclidiana entre el punto x y y . Es decir, $r = |x - y|$. Por su parte, el Stresslet corresponde a una singularidad fundamental, la cual puede encontrarse mediante la definición de $\sigma(x, y)$ en la ecuación (9). Esta se describe como lo indica la ecuación para el caso bidimensional.

$$K_{ij}(x, y) = \sigma_{ij} \left(\vec{u}^k(x, y) \right) n_k(y) = -\frac{1}{\pi} \frac{(x_i - y_i)(x_j - y_j)(x_k - y_k)n_k(y)}{r^4}, \quad (15)$$

3.6. Formulación directa para fluidos Newtonianos

Usando la formulación de Green para un sistema de ecuaciones de Stokes homogéneo, es posible encontrar una evaluación de las dos integrales de dominio que aparecen en la ecuación (11), por medio de las condiciones de flujo Stokes dadas en las ecuaciones (8) y (12). De esta forma se puede realizar una formulación directa para fluidos newtonianos, a la cual es posible aplicarle el método de Elementos de Frontera y encontrar su solución.

La formulación directa se ilustra en la ecuación (16):

$$u(x) = \int_s K_{ij}(x, y)u_j(y)dS_y - \int_s u_i^j(x, y)\sigma_{ik}(y)n_k(y)dS_y, \quad (16)$$

3.7. Trazado de trayectorias

La posición de una partícula en un instante de tiempo dado satisface la ecuación diferencial expresada en (17):

$$u_i = \dot{x}_i = \frac{dx_i}{dt}, \quad (17)$$

Para poder realizar el seguimiento de cada partícula (*Tracking de partícula*) de fluido al interior de la cámara, basta con integrar la ecuación (17). Para esto aplicamos Runge-Kutta de orden 2.

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \Delta t(a_1 k_1^i + a_2 k_2^i), \quad (18)$$

donde

$$k_1^i = u_i(x_t, y_t),$$

$$k_2^i = u_i(x_t + q\Delta t, y_t + qk_1\Delta t),$$

$$a_1 + a_2 = 1$$

$$a_2q = \frac{1}{2}$$

De (18) es necesario conocer el campo de velocidades en todo el dominio Ω . Una forma sencilla de realizar esto se consigue al interpolar la función u :

$$u_i(x) = \sum_j c_j f_j(x) \quad x \in \mathbb{R}^2, \quad (19)$$

donde f_j pertenece a una familia de funciones cualquiera. Si $f_j(x) = \Phi(r_j)$ con $r_j = \|x - x_j\|$, entonces se tiene una aproximación de funciones de base radial donde r_j representa la distancia a cada punto interpolante x_j . Nuestra función (19) se convierte entonces en:

$$u_i(x) = \sum_j c_j \Phi_j(r_j) \quad \forall x \in \Omega, \quad (20)$$

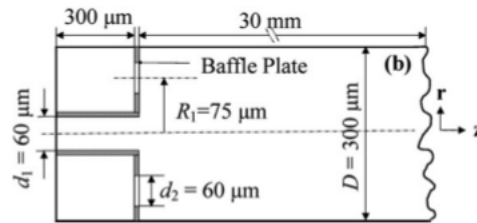
donde

$$\Phi(r) = r^2 \ln r \quad (21)$$

4. Metodología de trabajo

4.1. Generalidades

Los microcombustores prometen ser una alternativa eficiente a la elevada demanda energética de los tiempos actuales y venideros, ofreciendo una ventaja considerable que consiste en su pequeño tamaño. Esta misma ventaja que los hace tan atractivos, los convierte también en foco de estudios, debido a que se hace necesario conocer el comportamiento de los fluidos que interactúan al interior del microcombustor, considerando la escala a la cual se genera esta interacción. Comprender la interacción de ambas corrientes a medida que ingresan a la unidad de microcombustión y pasan por obstáculos que restringen su flujo, es parte fundamental para el desarrollo masivo de estos dispositivos. Es por esto que tanto el comportamiento fluidodinámico como el comportamiento térmico que se presenta al interior de los microcombustores debe ser analizado, cuando al interior de estas unidades se lleva a cabo un proceso de combustión debido a la interacción de ambas corrientes y a condiciones de presión y temperatura que propician el proceso.



El microcombustor elegido para llevar a cabo las simulaciones corresponde al estudiado por Moghtaderi, ilustrado en la figura 5b, la cual se repite aquí por facilidad de lectura. Este microcombustor consiste en una cámara cilíndrica, al interior de la cual hay un dispositivo diseñado para que los dos fluidos que reaccionarán al interior, entren de forma separada (es decir, sin premezcla) y se genere la interacción deseada gracias a condiciones geométricas, de presión y temperatura.

La corriente de combustible Γ_g ingresa a la microcámara de combustión por la parte central, de manera axial. Por su parte, las corrientes de aire Γ_a que son necesarias para que se de el proceso de combustión, entran por varias secciones igualmente distribuidas, de manera axial. Debido a que el microcombustor estudiado presenta simetría con respecto al eje, para simplificar el diseño y poder estudiar el comportamiento bidimensional de las dos corrientes, se considera el plano central de la microcámara, con el

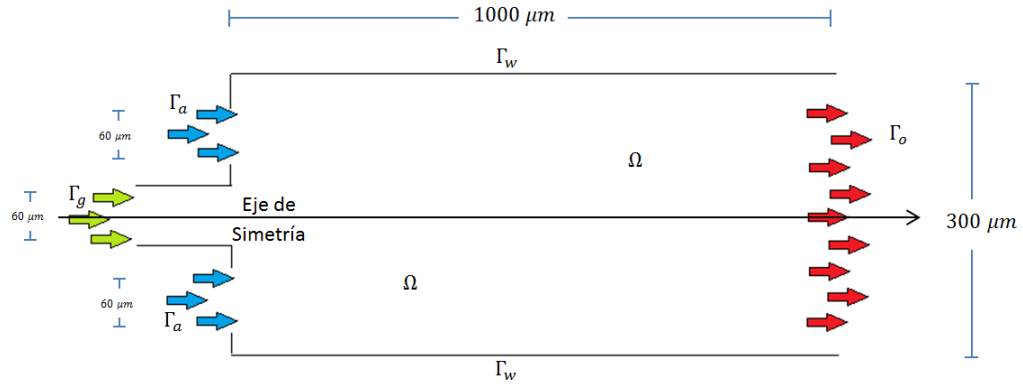


Figura 6: Diseño esquemático del microcombustor a estudiar (sin deflectores)

acceso de combustible en la parte central y dos corrientes de aire a cierta distancia del centro. Esta característica de simetría es bastante útil en el caso del uso del software comercial, dado que es posible simular tan solo la mitad de la cámara de combustión (del eje central hacia arriba, por ejemplo) y posteriormente extender el resultado a todo el dominio, lo cual genera ahorros en el tiempo y la capacidad de computo requerida. Para efectos prácticos, se ha restringido la longitud del microcombustor a $1300 \mu\text{m}$ puesto que se observó que para todos los casos estudiados, el comportamiento del fluido es similar incluso desde antes de este punto hasta la salida del microcombustor. Para propiciar la interacción de las corrientes en el microcombustor, se han diseñado algunos deflectores al interior de la cámara. Las características de cada una de las situaciones diseñadas serán explicadas en cada una de las secciones correspondientes.

En lo que respecta a los fluidos analizados, se consideran corrientes de fluido homogéneas e incompresibles. Para que el modelo propuesto funcione, se debe garantizar números de Reynolds lo suficientemente bajos, que son característicos en este tipo de problemas de flujo a escala micro. Las propiedades de los fluidos se describen en el cuadro 3.

Propiedad	Valor	Unidades
Viscosidad	$1,87 \times 10^{-11}$	$\frac{\text{kg}}{\mu\text{m}\cdot\text{s}}$
Densidad	$1,17 \times 10^{-18}$	$\frac{\text{kg}}{\mu\text{m}^3}$

Tabla 3: Propiedades del fluido

Uno de los objetivos del trabajo comprende simulaciones fluidodinámicas del comportamiento de los fluidos al interior de la microcámara de combustión, mediante el uso del método de Elementos de Frontera y a través del uso de un software comercial. En este caso, para la implementación del método numérico se utilizó el software *MATLAB* en conjunto con rutinas del método de Elementos de Frontera suministradas por Ph.D Mauricio Giraldo, y como software comercial se utilizó *Fluent*, un paquete del software de simulaciones de ingeniería *ANSYS*.

La condición de frontera puede variar entre velocidad y tracción, dependiendo del dato que sea conocido. Para nuestro caso consideraremos cuatro diferentes fronteras. La primera frontera correspondiente a la entrada de combustible, ubicada en la parte central izquierda del microcombustor. La segunda frontera corresponde a la entrada de aire, las cuales están distribuidas simétricamente en la parte izquierda del microcombustor. La tercera frontera corresponde a la salida de la microcámara, ubicada en el extremo derecho de la unidad. Por último, las demás partes de la frontera que aún no tienen una condición asignada corresponden a paredes, que tienen otra condición de frontera diferente. Estas condiciones se describen en el cuadro 4¹.

Condición de Frontera	Velocidad/Tracción en X	Velocidad/Tracción en Y	Condición
Entrada de Gas (Γ_g)	$Vel = 500\mu m/s$	$Vel = 0\mu m/s$	Velocidad de entrada de gas
Entrada de Aire (Γ_a)	$Vel = 2000\mu m/s$	$Vel = 0\mu m/s$	Velocidad de entrada de aire
Presión de Salida (Γ_o)	$Tracción = 0$	$Tracción = 0$	Salida a presión atmosférica
Pared (Γ_w)	$Vel = 0\mu m/s$	$Vel = 0\mu m/s$	Condición de No Deslizamiento

Tabla 4: Condiciones de frontera

¹Las velocidades de entrada del gas a la cámara de combustión serán variadas.

En lo que corresponde a los parámetros para la simulación, se han utilizado los datos que se ilustran en el cuadro 5. Estos parámetros son explicados posteriormente:

Parámetro	Valor
Npg	12
itmax	50
tolerance	1×10^{-3}

Tabla 5: Parámetros para la simulación

En las gráficas 7 y 8 se describe el proceso realizado para llevar a cabo las simulaciones tanto en el caso de utilizar el método de Elementos de Frontera, como mediante el uso de software comercial, y serán explicados en las subsecciones siguientes.

Situación	Velocidad Aire	Velocidad Gas
I	$2000 \mu m/s$	$500 \mu m/s$
II	$2000 \mu m/s$	$750 \mu m/s$
III	$2000 \mu m/s$	$1000 \mu m/s$

Tabla 6: Variación de la velocidad para las diferentes simulaciones

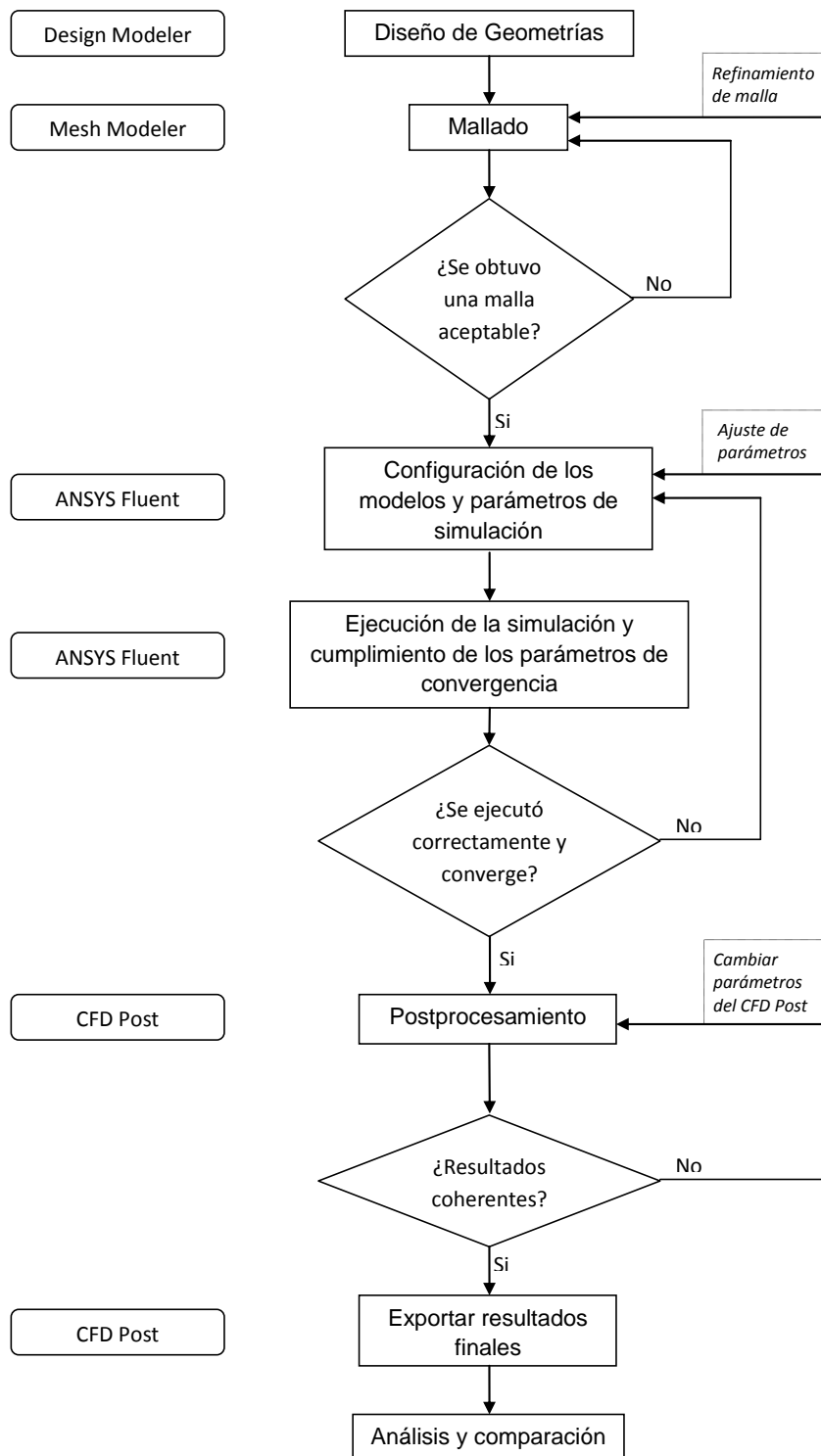


Figura 8: Metodología de la simulación mediante ANSYS Fluent

4.2. Simulación mediante Elementos de Frontera

GiD

GiD es un pre y postprocesador para simulaciones numéricas en ciencia e ingeniería, cuyas características principales consisten en la fácil adaptación del usuario mediante un entorno amigable. Ha sido diseñado para cubrir todas las necesidades comunes en el campo de las simulaciones numéricas desde el preprocesamiento hasta el post procesamiento, cubriendo campos como el modelamiento geométrico, la definición efectiva de los datos, procesos de mallado y visualización de resultados numéricos. Es deducible de este enunciado que GiD es un programa para el preprocesamiento y el postprocesamiento de datos, pero no un programa para procesar datos; es decir, GiD no realiza simulaciones, solamente prepara las condiciones iniciales de los datos antes de ser utilizados para simulaciones y posteriormente visualiza los resultados obtenidos de la simulación. Para efectos de este trabajo de grado, se utilizará GiD como software para realizar la modelación geométrica de los microcombustores, así como para generar las mallas y exportar los archivos con los datos correspondientes a las mismas. No se utilizará como postprocesador.

MATLAB

«MATLAB es un lenguaje de alto nivel y ambiente interactivo para la computación numérica, visualización y programación»². Utilizando las diferentes herramientas que MATLAB ofrece, es posible realizar modelos, aplicaciones, analizar datos, generar algoritmos, realizar gráficas tanto en 2D como en 3D con una gran cantidad de características especiales. Una de las grandes funcionalidades que MATLAB ha introducido dentro de su software son los módulos de funciones enfocadas hacia diferentes áreas de la ingeniería y la ciencia, lo cual hace posible el procesamiento de señales, el control de sistemas, aplicaciones directas en biología computacional, procesamiento de video y muchas aplicaciones más. Este lenguaje, usado por más de un millón de usuarios a nivel mundial, permite explorar diferentes acercamientos a la solución de problemas de ciencia e ingeniería de forma rápida y ágil, en comparación a los lenguajes de programación tradicionales.

² Tomado de: http://www.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html

Rutinas de simulación BEM bajo Fortran

La simulación mediante Elementos de Frontera se realiza a partir de rutinas suministradas por Ph.D Mauricio Giraldo. Estas rutinas necesitan una cantidad de información de entrada que debe ser suministrada adecuadamente para poder ejecutar la simulación, y cuyas características serán explicadas posteriormente. En este caso, se utilizarán dichas rutinas como código base de un software de simulación para la solución de un problema fluidodinámico, aunque sus usos pueden ir mucho más allá en la solución de problemas de ingeniería.

4.2.1. Diseño de geometrías

El primer paso que se debe dar para poder solucionar el problema presentado anteriormente corresponde al diseño de los microcombustores. De acuerdo a lo descrito en la subsección 4.1, se ha elegido el microcombustor presentado por Moghtaderi como modelo base, pero se han hecho algunas modificaciones para facilitar su simulación, al igual que la visualización de los resultados.

Para el preprocesamiento se ha utilizado el software GiD Versión 9, en el cual se pueden diseñar las geometrías tal como se muestra en la figura 9. El diseño básico de todos los microcombustores es similar; es decir, las dimensiones exteriores no varían para ninguno de los casos. Sin embargo, aquellos que utilizan deflectores en su interior, presentarán diseños y distribuciones diferentes. Estos detalles serán presentados a medida que corresponda cada uno de los diferentes casos.

Se hace necesario a la hora de finalizar el diseño de la geometría (identificada en la figura 9 por una línea azul) generar una superficie NURBS (identificada en la figura 9 por una línea magenta), puesto que esta es la base de partida para el siguiente paso. En los casos en los cuales hay deflectores internos, estos se consideran como superficies adicionales, los cuales no se mallarán.

La figura 10 muestra las geometrías de los seis casos diferentes que se han considerado para los microcombustores. El primer caso, correspondiente a un microcombustor tal como es propuesto por Moghtaderi, el segundo caso considerando dos deflectores cuadrados girados 45° , a la misma distancia desde el eje de simetría. El tercer caso incluye un deflector adicional, con las mismas características del anterior, pero ubicado

en el eje de simetría de la microcámara. El cuarto, quinto y sexto caso corresponden a diseños especiales de deflectores.

Cuando todos los elementos anteriores se han considerado y la geometría se encuentra lista, se puede continuar con el siguiente paso; el mallado de la geometría.

4.2.2. Mallado

El proceso de mallado es uno de los más importantes a la hora de realizar el preprocesamiento dado que un mal mallado puede ser la causa del fracaso de una simulación. Este proceso consiste en la subdivisión del dominio en nodos y elementos interrelacionados, para poder aplicar sobre cada uno de ellos las ecuaciones que rigen el comportamiento del fenómeno estudiado. En este caso, se utiliza el mallador de GiD Versión 9 para generar las mallas con las cuales se correrán las simulaciones.

Para que las mallas que se generen sean compatibles con el programa que ejecuta el método de Elementos de Frontera (BEM), se utilizan elementos cuadriláteros Q9, que corresponden a nueve nodos por cada elemento, distribuidos en las cuatro esquinas, el centro de los cuatro vértices y el centro del elemento. Las mallas que se generan son de carácter estructurado y debido a que se utilizó la versión de evaluación del programa, tienen un máximo de 1010 nodos.

Dependiendo del tipo de problema que se desee solucionar y de la geometría que se analice, será deseable tener algunos lugares con mayor cantidad de elementos que en otros. Esto se puede lograr a partir de refinamientos en algunas zonas dentro del

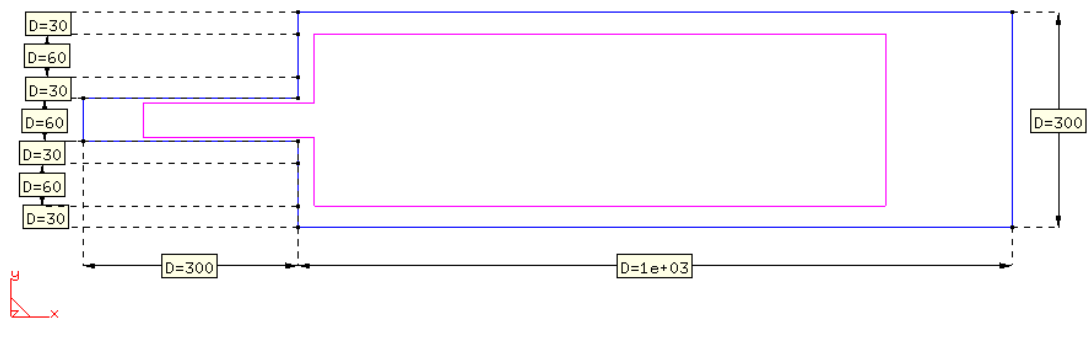


Figura 9: Geometría básica del microcombustor

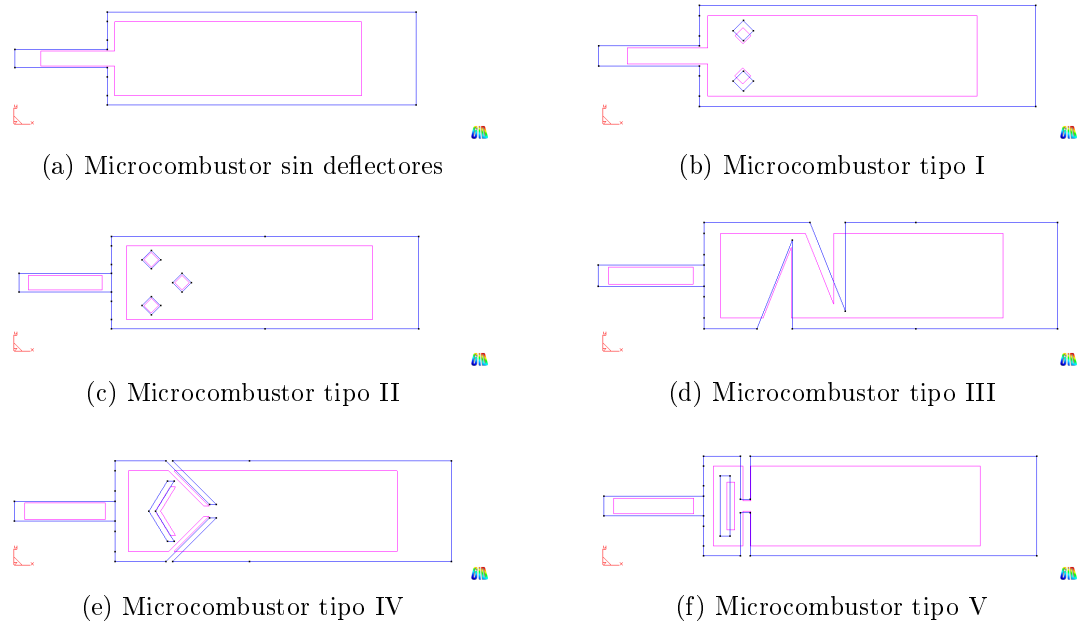


Figura 10: Diferentes configuraciones geométricas de los microcombustores

dominio y GiD permite hacerlo, aunque su implementación no sea la más amigable. Es posible aumentar la cantidad de nodos en cada línea o concentrar elementos hacia un lado u otro.

En las subfiguras incluidas en la figura 11, se ilustran las mallas finales correspondientes a cada microcombustor. Acá se hace necesario aclarar que debido a que se utiliza la licencia de evaluación del software, no es posible llegar a un alto grado de refinación o a calidades de malla muy elevadas; lo cual influye directamente en la convergencia del método numérico a la hora de buscar la solución al problema físico. Adicional a esto, el recurso computacional con el que se contó para realizar las simulaciones es limitado, y tomando en consideración los resultados obtenidos, no se evidenció la necesidad de obtener mayor refinación en la mayoría de las mallas. Igualmente, se llegó a estas mallas después de realizar un proceso iterativo bajo las indicaciones del director del trabajo de grado, Ph.D Mauricio Giraldo, refinando en los lugares en los cuales el comportamiento de los fluidos puede presentar mayor complejidad. Este proceso se muestra en la figura 7. Dado que la malla puede ser un impedimento para que la simulación alcance los criterios de convergencia, es un factor a considerar a la hora de presentarse algún problema durante el procesamiento de los datos o incoherencias en el postprocesamiento.

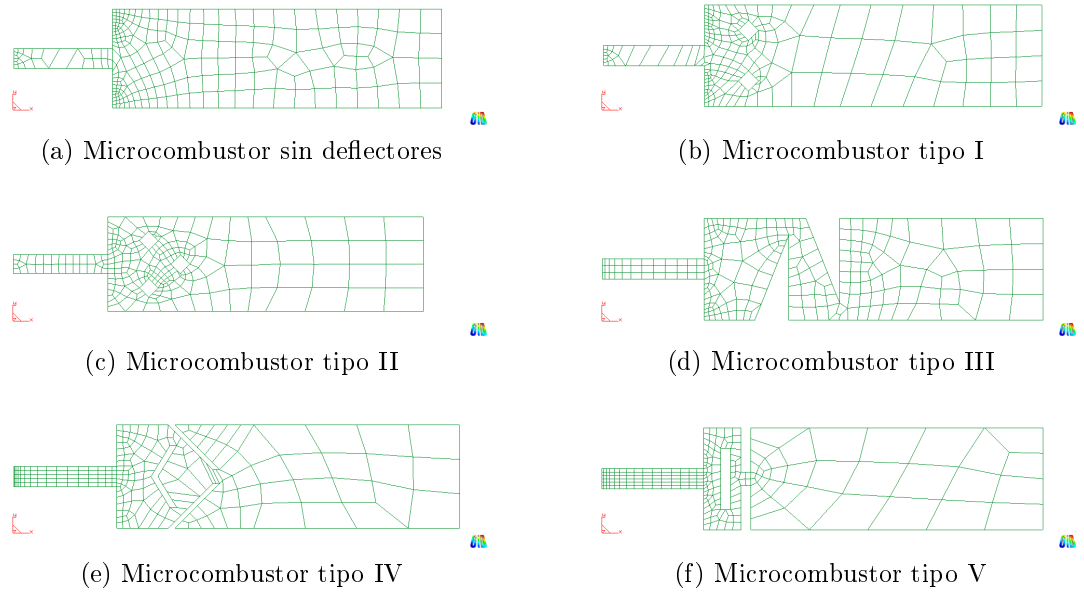


Figura 11: Mallas correspondientes a cada microcombustor modeladas en GiD

En el cuadro 7 son enunciados la cantidad de nodos, nodos en la frontera y elementos que constituyen cada una de los tipos de microcombustores que se tratan en este trabajo.

Tipo de Microcombustor	Número de Nodos	Número de Nodos en la Frontera	Número de Elementos
Sin deflectores	1007	204	226
Tipo I	897	228	196
Tipo II	1004	220	224
Tipo III	1109	248	246
Tipo IV	1030	268	224
Tipo V	1026	252	225

Tabla 7: Número de nodos y elementos para cada microcombustor modelado mediante GiD

4.2.3. Ejecución del programa y presentación de resultados

Compilación de archivos para generación de solucionador

El proceso de ejecución del programa comienza con la preparación del solucionador que corre el método numérico para el problema físico. Estos archivos son suministrados por Ph.D Mauricio Giraldo, pero deben ser compilados en un solo ejecutable para poder correr el programa en el sistema operativo con el cual se está trabajando. Esta rutina, que constituye el código fuente del software de simulación del método de Elementos de Frontera, es llamada ‘**Solver**’ y se utiliza para llevar a cabo la simulación una vez se tengan todos los archivos de entrada para que el solucionador funcione.

Exportación de archivos desde GiD a .txt

Después de haber obtenido las mallas con las cuales se esté conforme, se debe exportar cada malla como GiD Mesh, lo cual corresponde a un archivo *.txt* que contiene toda la información característica de la malla. GiD exporta este archivo con una cantidad de información que no es necesaria para la ejecución del solucionador, por ende es necesaria la modificación de este archivo, inicialmente cambiando la extensión del mismo de *.msh* a *.txt*, modificando el nombre a *inputmesh.txt* y adicionalmente haciendo una modificación manual para que el archivo quede con la siguiente información y estructura:

- Las primeras dos líneas indican el número de nodos y el número de elementos de la malla.
- La tercera línea indica el inicio de las coordenadas mediante el título ‘*coordinates*’. Las líneas siguientes están distribuidas en diferentes columnas. En la primera columna se ubica el número del nodo, en las columnas dos, tres y cuatro se anuncian las coordenadas de cada nodo con respecto al eje X, Y y Z, respectivamente. Debido a que este problema es analizado en el plano, la cuarta columna, correspondiente a la coordenada del eje Z, será siempre cero.
- Inmediatamente después del último nodo se enuncia el título ‘*elements*’ correspondiente al inicio de la relación de los elementos con cada uno de los nodos presentes en él. Esta distribución está dada por diez columnas, donde en la primera se indica el número de elemento y en las nueve siguientes se relaciona cada nodo correspondiente al elemento identificado anteriormente.

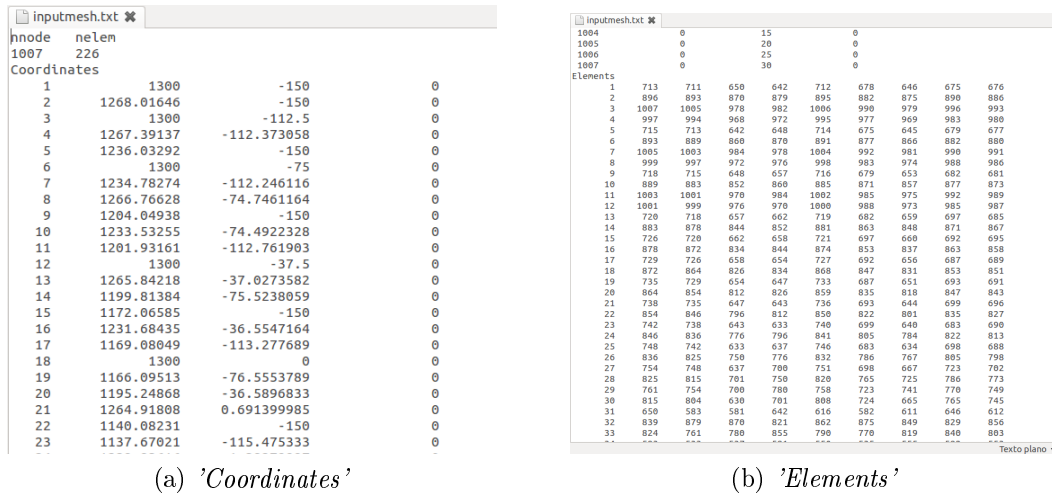


Figura 12: Detalle de *inputmesh.txt* después de ser exportado en GiD y modificado

La figura 12 muestra un archivo *inputmesh.txt* para aclarar cada una de las partes descritas anteriormente.

Es sumamente importante que cada uno de los archivos de entrada del sistema tengan estrictamente el formato requerido por el solucionador, puesto que en caso contrario, el resultado durante la simulación siempre será un error. Por este motivo, hay que ser bastante cuidadoso con la manipulación de estos datos, y evitar trocar líneas, alterar formatos, entre otros.

Generación de archivos de entrada en MATLAB

Adicional a *inputmesh.txt*, es necesario generar una serie de archivos que se encargan de dar las características al problema que se debe solucionar. Estos archivos son generados directamente desde MATLAB a partir de la programación realizada, y sus características son descritas posteriormente. Para la creación de estos archivos se programó una rutina en MATLAB llamada *CrearCaso.m*, la cual está encargada de generar los archivos *inputbc.txt*, *inputpara.txt*, *inputrbf.txt*. El argumento que toma *CrearCaso.m* para poder correr es únicamente el directorio donde se almacenarán los archivos generados, sin embargo dentro de su desarrollo usa un archivo importante llamado *case.m*.

case.m es un archivo escrito desde MATLAB para determinar los *parámetros* de

cada caso y poder generar los demás archivos que son necesarios como archivos de entrada para '**Solver**'. Es por esto que cada caso estudiado tiene su propio *case.m*. Dentro de *case.m* se almacena información característica del fluido, parámetros propios de la simulación, coeficientes para las funciones de base radial, parámetros geométricos del microcombustor, las condiciones de frontera y en el caso de haber deflectores, su posición y parámetros de forma.

Por su parte, *inputbc.txt* es el archivo encargado de generar las condiciones de frontera para cada uno de los nodos que conforman la frontera del dominio. El archivo inicialmente reporta la cantidad de nodos de frontera presentes en el dominio y de la tercera línea en adelante presenta cinco columnas denominadas '*Node*', '*XCode*', '*XVal*', '*YCode*', '*YVal*'. La primera columna indica el número del nodo de frontera. La segunda columna indica el tipo de condición de frontera que le corresponde al nodo, en la dirección X. Cuando *XCode* toma el valor de 1, indica condición de frontera de velocidad en la dirección X. Si *XCode* toma el valor de 2, indica condición de frontera de tracción en la dirección X. La tercera columna, llamada *XVal*, corresponde al valor numérico de la condición de frontera de la columna anterior. De manera análoga, la cuarta y quinta columna (*YCode* y *YVal*) corresponden a la condición de frontera de velocidad o de tracción en la dirección Y y al valor numérico de la condición de frontera, respectivamente.

El archivo *inputpara.txt* se encarga de suministrarle al solucionador los parámetros que este requiere para su ejecución. Dentro de este archivo están listados parámetros como el Npg^3 , la viscosidad del fluido, el número máximo de iteraciones del solucionador, así como la tolerancia para determinar la convergencia de la solución encontrada.

Ejecución del solucionador

El solucionador es el encargado de ejecutar el método numérico de Elementos de Frontera sobre el dominio planteado y con las condiciones descritas anteriormente. La ejecución del solucionador se realiza de forma manual directamente desde la terminal de usuario. En la 'Terminal' se observa cada uno de los pasos que realiza el '**Solver**' para encontrar la solución y el tiempo total de simulación. En este caso el solver utiliza un solucionador directo, lo cual garantiza la convergencia de la solución. Adicionalmente,

³Número de puntos de Gauss para la integración numérica

en el directorio donde se ubica 'Solver' se van escribiendo cada uno de los archivos que contienen los resultados de la simulación. Estos archivos son *outelems.txt*, *outhistory.txt*, *outnvecs.txt*, *outtralin.txt* y *outvelolin.txt*.

outelems.txt contiene el número de cada elemento y los nueve nodos que se encuentran a su alrededor, en un archivo compuesto por diez columnas. *outhistory.txt* registra cada uno de los pasos en los que se encuentra la ejecución del 'Solver', así como el tiempo de inicio y fin de ejecución del programa, lo cual corresponde al tiempo total de simulación. *outnvecs.txt* indica los vectores normales de los elementos en cada punto de Gauss. Con esta información se puede validar la malla. *outtralin.txt* es un archivo que indica el vector de tracción lineal asociado a cada uno de los nodos de frontera del dominio. Está conformado por cinco columnas, donde la primera columna indica el número del nodo de frontera, la segunda y tercera indican las coordenadas en X y Y de cada nodo, mientras que la cuarta y quinta columna indican las coordenadas del vector de tracción lineal. Por su parte *outvelolin.txt* proporciona información sobre el vector de velocidad lineal asociado a cada nodo del dominio, tanto interno como frontera. Este archivo está compuesto por cinco columnas, donde se indica el número del nodo, las coordenadas en X y Y de cada nodo y las coordenadas del vector de velocidad lineal asociado a cada nodo. Este archivo es el más importante de los generados porque permitirá la creación de perfiles de velocidad al interior de la cámara de combustión.

Graficación de resultados en MATLAB

Una vez se obtienen los archivos de salida del solucionador, es posible graficarlos para observar las velocidades calculadas en cada nodo al igual que el seguimiento de partícula. Como el objetivo es graficar la malla de cada microcombustor, los vectores de velocidad en cada nodo, los perfiles de velocidad en X y Y y el seguimiento a la partícula, se necesitarán archivos del preprocesamiento y de los generados por el 'Solver' para poder realizar el postprocesamiento.

Inicialmente se grafica la malla del microcombustor, para lo cual se usa el archivo *inputmesh.txt*. Seguidamente se realiza la gráfica del campo de velocidades utilizando el archivo *outvelolin.txt*. Uno de los retos consiste en la gráfica de los perfiles de velocidad en X y Y, puesto que es necesario encontrar el patrón por el cual están relacionados cada uno de los nodos a su elemento y poder generar contornos sobre el dominio de los

microcombustores. Finalmente se realiza la gráfica del seguimiento de partícula a partir del trazado de trayectorias, mediante interpolación con Runge-Kutta de orden 2.

Retroalimentación

Siempre que se detecte algún error en cualquier parte del proceso, se hace necesario revisar lo que se encuentra antes para poder corregir su aparición. Esta retroalimentación se visualiza mediante el esquema mostrado en la figura 7, y constituye el proceso iterativo de la simulación.

4.3. Mediante el uso del software comercial

ANSYS

«ANSYS desarrolla, comercializa y soporta software de simulación en ingeniería usado para prever cómo los diseños del producto se comportarán y cómo los procesos de manufactura operarán en ambientes del mundo real»⁴. ANSYS comprende una gran cantidad de productos para todo tipo de problema en ingeniería, incluyendo áreas como la electrónica, mecánica de fluidos, análisis estructural, *multiphysics*, entre otros. En este caso puntual, nos concentraremos en el paquete de ANSYS Fluent.

Una de las ventajas que tiene el uso de software comercial (ANSYS 14.0 en este caso) para la solución de problemas de simulación consiste en la integración de productos y ambiente amigable para el usuario. Estos puntos son claves debido a que facilitan la labor de quien desea realizar las actividades, simplificando el manejo y la migración de datos de un programa a otro. En el caso preciso de ANSYS Fluent se integran cinco módulos en el Workbench (espacio de trabajo), conformados por Geometry (Design Modeler), Mesh (Meshing), Setup, Solution y Results. De manera análoga a lo descrito anteriormente mediante el uso de Elementos de Frontera, se debe iniciar el proceso con el diseño de las geometrías.

4.3.1. Diseño de geometrías

El diseño de las geometrías es en este caso una actividad más sencilla debido a que el módulo Design Modeler es mucho más similar a un programa de CAD. Sin embargo,

⁴Tomado de: www.ansys.com/About+ANSYS

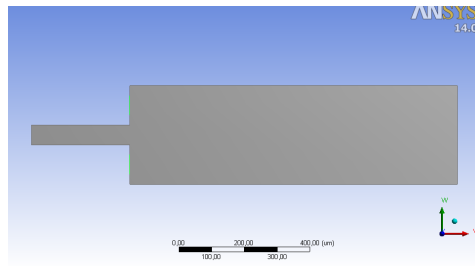
el proceso para realizarlas es prácticamente el mismo que en el caso descrito anteriormente (usando GiD). Inicialmente se debe generar un dibujo de la geometría deseada, que para este caso es en 2D (también puede ser en 3D, según la necesidad), y posteriormente sobre este dibujo se debe generar una superficie, que es el lugar sobre el cual se realizará todo el trabajo (se subdividirá para formar la malla, el dominio sobre el cual se realizará la simulación, sobre el cual se plasmarán los resultados, etc.).

Estos modelos se han construido conservando las medidas especificadas anteriormente, tanto para la cámara de combustión como para los deflectores. En la figura 13 se observan las diferentes geometrías y las superficies (en gris) que se han generado sobre estas.

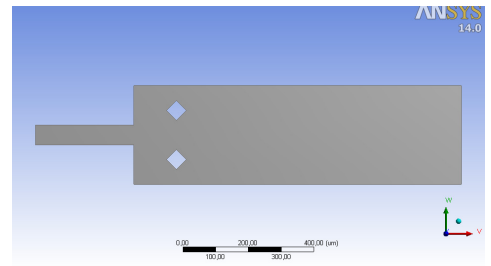
4.3.2. Mallado

Como recurso de entrada para acceder al módulo Meshing se requiere que la geometría haya sido bien definida en el Design Modeler. En caso contrario, se generará un error que impedirá la entrada al módulo. Una vez dentro del módulo, es posible generar mallas en el modelo de manera sencilla, sin embargo existen algunos métodos para incrementar la cantidad de nodos en algunos puntos de la geometría donde se considere necesario. Este proceso de refinamiento de malla es muy importante para garantizar que la solución alcance la convergencia y sea mucho más ajustado.

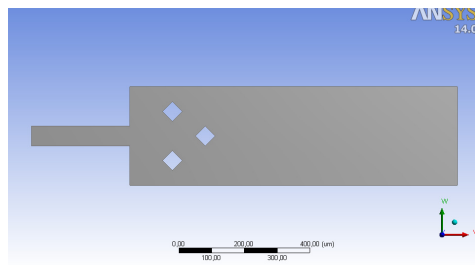
Al igual que en GiD, también existen criterios para la calidad de la malla, pero como se ha dicho anteriormente, el diseño final de la malla está dado por el criterio de la persona que realiza las simulaciones y por los resultados de las mismas, obviamente teniendo en cuenta el apoyo de estas estadísticas para determinar la calidad de la malla. En este caso, se cuenta con una licencia académica del software y por ende hay una restricción menor en el número de nodos, lo cual permite realizar refinamientos mucho mejores y alcanzar un mayor grado de confiabilidad en la solución encontrada. De acuerdo a las indicaciones recibidas para el refinamiento mediante el uso de BEM, se aumentó la densidad de nodos de la malla en los puntos considerados estratégicos para cada una de las situaciones. En la figura 14 se encuentran las mallas generadas en el módulo Meshing para cada una de las geometrías. De igual forma, en la tabla 8 se indican la cantidad de nodos y elementos que componen cada una de las diferentes configuraciones de los microcombustores presentados. En este caso se puede trabajar



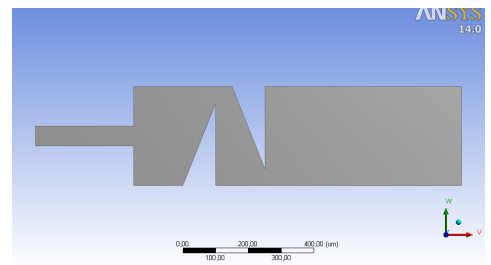
(a) Microcombustor sin deflectores



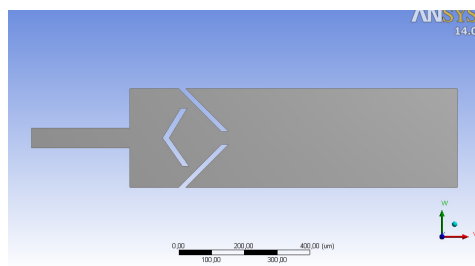
(b) Microcombustor tipo I



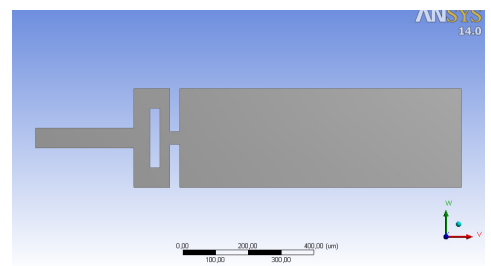
(c) Microcombustor tipo II



(d) Microcombustor tipo III

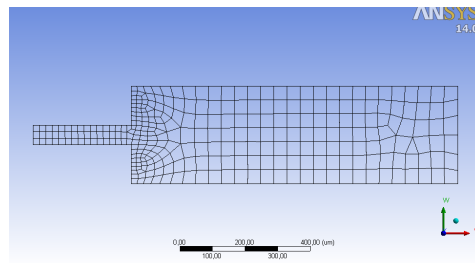


(e) Microcombustor tipo IV

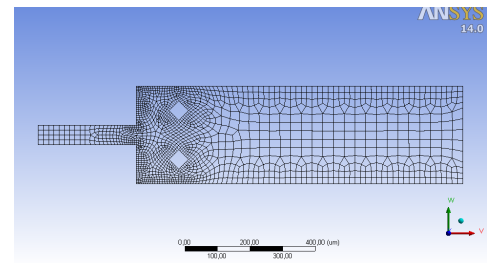


(f) Microcombustor tipo V

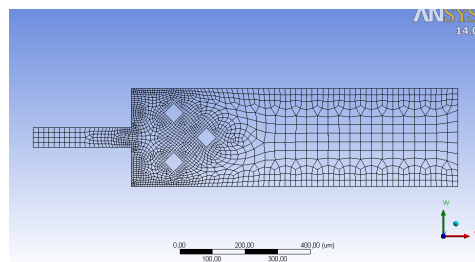
Figura 13: Diferentes configuraciones geométricas de los microcombustores modeladas en ANSYS



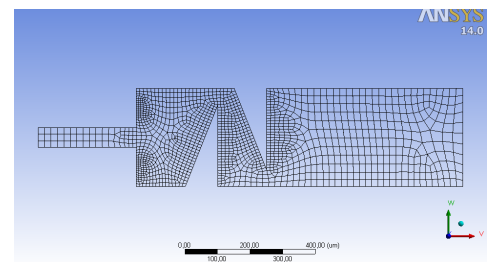
(a) Microcombustor sin deflectores



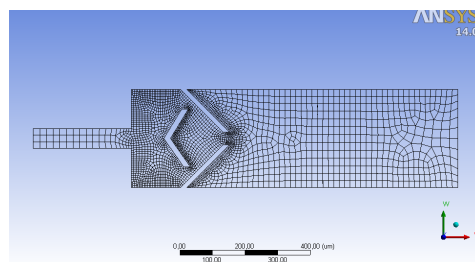
(b) Microcombustor tipo I



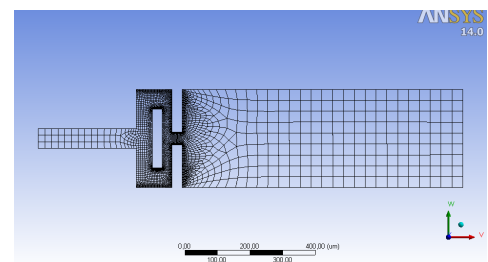
(c) Microcombustor tipo II



(d) Microcombustor tipo III



(e) Microcombustor tipo IV



(f) Microcombustor tipo V

Figura 14: Mallas correspondientes a cada microcombustor modeladas en ANSYS

con una mayor cantidad de nodos, lo cual permite obtener mallas mucho más refinadas y analizar parámetros para determinar la calidad de la malla.

Es muy importante nombrar las secciones que son frontera en el modelo (mediante la generación de Name Selections), puesto que serán la referencia para la asignación de los valores de frontera en el siguiente módulo.

4.3.3. Solución mediante el módulo Fluent

El siguiente paso consiste en la asignación de parámetros para los modelos que se solucionarán durante la simulación. Para poder acceder a este módulo es necesario haber

Tipo de Microcombustor	Número de Nodos	Número de Elementos	Calidad de Elemento		
			Min	Max	Promedio
Sin deflectores	354	297	0,4603	0,9992	0,8942
Tipo I	1751	1597	0,2296	0,9982	0,8196
Tipo II	1973	1808	0,2795	0,9974	0,8207
Tipo III	1576	1418	0,3640	0,9993	0,8696
Tipo IV	3123	2849	0,1856	0,9993	0,8305
Tipo V	3970	3614	0,2782	0,9994	0,8055

Tabla 8: Número de nodos y elementos para cada microcombustor modelado mediante ANSYS

completado satisfactoriamente la parte de diseño de geometría y generación de malla, debido a que el archivo de malla es la entrada para este módulo de solución.

Para llevar a cabo las simulaciones en FLUENT se utiliza procesamiento serial, de doble precisión. En lo que respecta a la configuración del problema, se utiliza un solucionador basado en presión con una formulación de velocidad absoluta. En este caso se soluciona un problema en estado estacionario y aplicable a una geometría en el plano.

Dadas las características del problema analizado y los bajos números de Reynolds y Mach que se observan al interior de la microcámara de combustión, se selecciona un modelo de flujo laminar para simular las corrientes de aire y combustible que interactúan entre sí. De igual manera, se especifican las condiciones de frontera tal como se indicaron anteriormente.

En lo que corresponde a los métodos de solución, se utilizó el esquema SIMPLE para el acople presión-velocidad y el método Second Order Upwind para la discretización espacial del momentum. Se fija la tolerancia en un valor correspondiente a 0.001 para la convergencia de la continuidad, la velocidad en X y la velocidad en Y, y adicionalmente se fija un máximo de 1000 iteraciones, sin embargo se alcanza la convergencia de todos los modelos en iteraciones mucho menores a las máximas (en promedio, los modelos convergieron en menos de 300 iteraciones).

El tercer y cuarto módulo de ANSYS Fluent corren de manera simultánea, por ende cuando converge la solución, es posible pasar al módulo de postprocesamiento.

4.3.4. Postprocesamiento

El módulo de postprocesamiento, también llamado CFD-Post, permite graficar de manera muy sencilla e interactiva los resultados obtenidos en los módulos anteriores. A partir de la generación de una superficie es posible plasmar sobre esta los resultados obtenidos mediante gráficas de contorno, líneas de corriente o streamlines, e inclusive es posible realizar cálculos. En este caso, y para poder realizar la comparación entre ambos modelos, se graficó la velocidad en x para cada una de las corrientes y adicionalmente se realizó un contorno de la velocidad al interior del microcombustor.

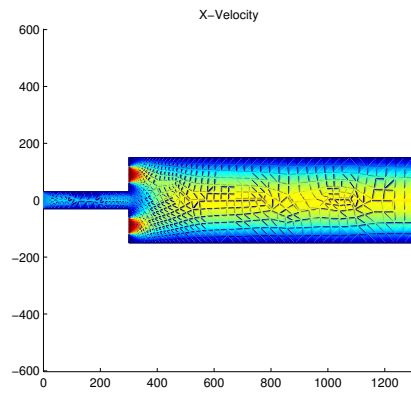
5. Análisis fluidodinámico

A continuación se presentarán los resultados obtenidos para cada una de las diferentes situaciones analizadas, tanto mediante el uso de Matlab como ANSYS. Utilizando el software MATLAB, se obtuvieron gráficas de las mallas empleadas, campos de velocidades al interior de los microcombustores, contornos de velocidad tanto en la componente X como en la componente Y, y el seguimiento de partícula al interior de las microcámaras. Por su parte, mediante el uso de ANSYS se generaron gráficas de los contornos de velocidad en la componente X y se utilizarán para la validación de las gráficas generadas por medio de la otra metodología.

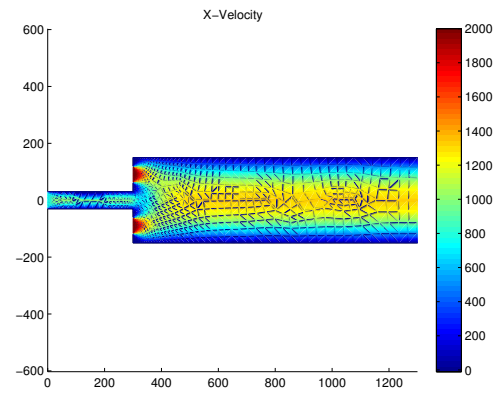
5.1. Microcombustor sin deflectores

El caso inicial corresponde a la cámara de combustión sin deflectores que se muestra en la figura 10a. Se simuló el microcombustor variando la velocidad de entrada de las corrientes, tal como se ilustra en el cuadro 6. Después de realizar las simulaciones se pueden hacer varias apreciaciones importantes con respecto a esta configuración, la cual no restringe el flujo de los fluidos al interior de la cámara. Se observa inicialmente una expansión de los gases cuando pasan de una parte del microcombustor de sección transversal menor a una de sección transversal mayor, en los tres casos. Este efecto implica una caída de presión traducida en reducción de la velocidad de los gases al interior de la microcámara. Este efecto se puede visualizar en el contorno de velocidades en dirección X que se muestra en la figura 15. Es evidente la expansión de los gases en las tres microcámaras, al igual que el cumplimiento de las condiciones de frontera, que indican velocidad cero en todas las paredes internas del dominio. De forma similar, se observa una región donde se homogenizan las velocidades, justo al interior del microcombustor, lo cual podría sugerir que esta región es adecuada para la combustión, sin embargo, las velocidades que se alcanzan en este microcombustor no son tan elevadas, lo cual disminuye la interacción de las corrientes. Esto último es muy importante debido a que bajo los regímenes de flujo que se manejan en este fenómeno, ambas corrientes de fluido parecen comportarse como sólidos, sin mezcla aparente de ambas, pero la combustión es posible gracias a interacciones en los límites de ambos dominios.

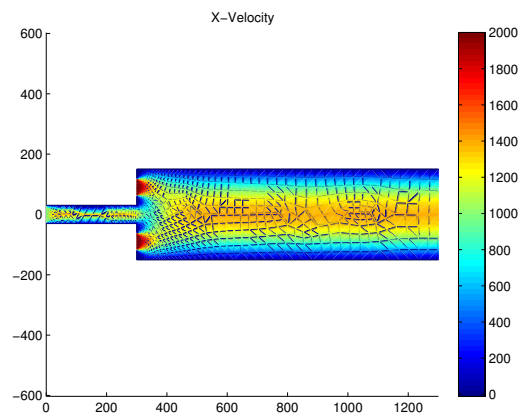
La figura 16 nos permite observar el campo de velocidades de la microcámara de combustión cuando no hay deflectores en su interior. Es fácil identificar que las mayores



(a) $V_{combustible} = 500 \mu m/s$



(b) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$



(c) $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$

Figura 15: Contornos de velocidad en X en microcombustor sin deflectores

concentraciones de velocidad se encuentran justo en la entrada de cada corriente, puesto que allí se encuentran los vectores de mayor magnitud y en mayores cantidades. Igualmente, a medida que los fluidos recorren la longitud de la cámara de combustión, es posible identificar como las velocidades aumentan desde las paredes del microcombustor hacia el centro, donde se presentan las mayores magnitudes.

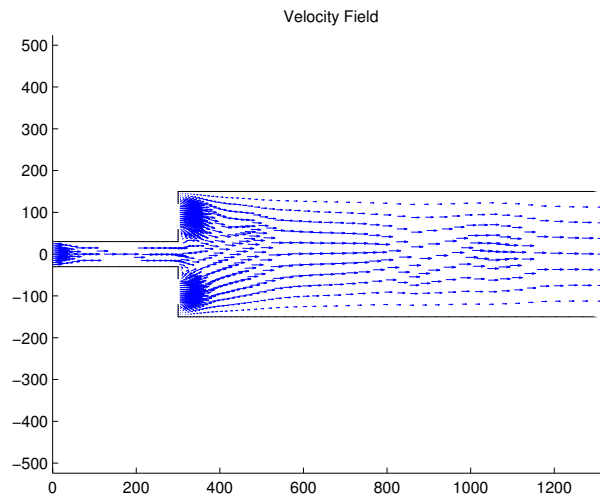
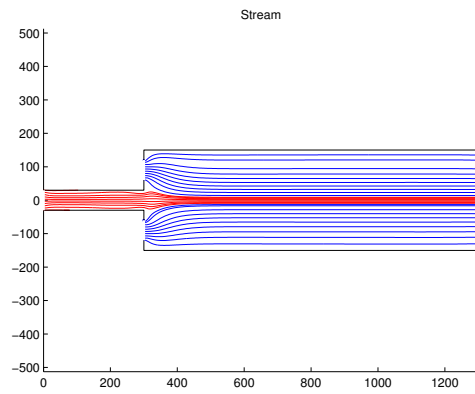
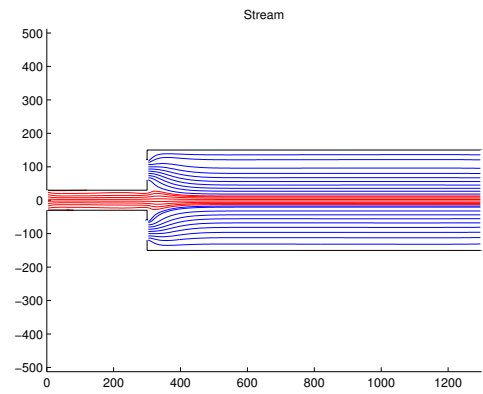


Figura 16: Campo de velocidad en microcombustor sin deflectores

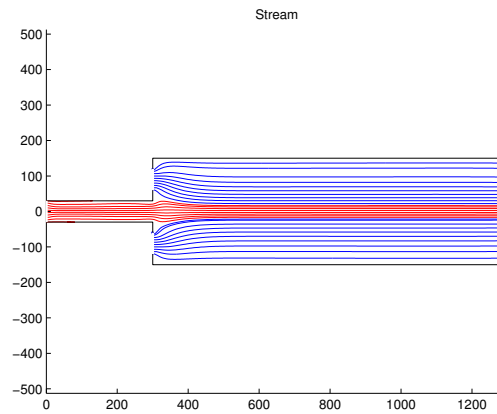
Se observa en la figura 17 el seguimiento de partícula de ambas corrientes al interior de las microcámaras de combustión. En ninguno de los tres casos presentados se observa una mezcla definitiva entre las dos corrientes de fluidos, sin embargo, se observa que sucede una interacción entre la corriente de combustible (identificada con el color rojo) y las corrientes de aire (identificadas con el color azul) a lo largo de la cámara de combustión, después del ingreso de las mismas. Cuando $V_{combustible} = 500 \mu m/s$, el aire al interior de la cámara tiende a comprimir las líneas de flujo de la corriente de combustible, aumentando su velocidad y favoreciendo la interacción entre las dos corrientes, pero disminuyendo su tiempo de residencia y por ende de reacción. Este fenómeno también sucede en los dos casos siguientes, pero es evidente que cuando $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$, la relación entre estas dos corrientes es menor y el efecto compresivo del aire también.



(a) $V_{combustible} = 500 \mu m/s$

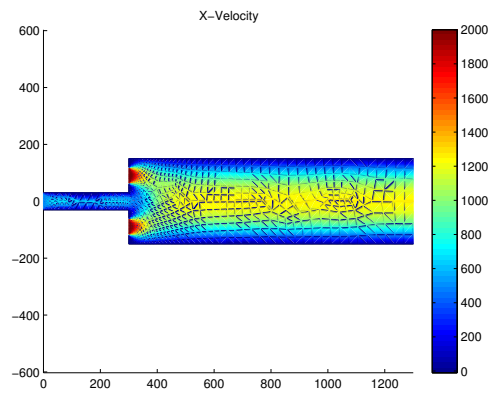


(b) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$

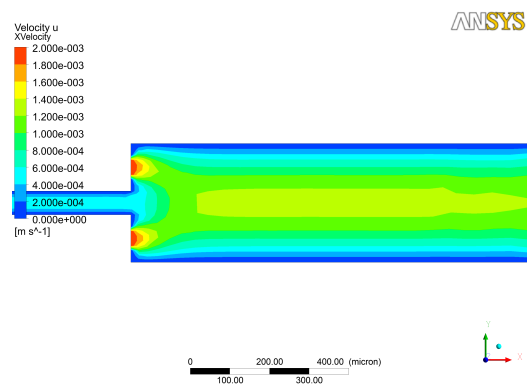


(c) $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$

Figura 17: Seguimiento de partícula en microcombustor sin deflectores



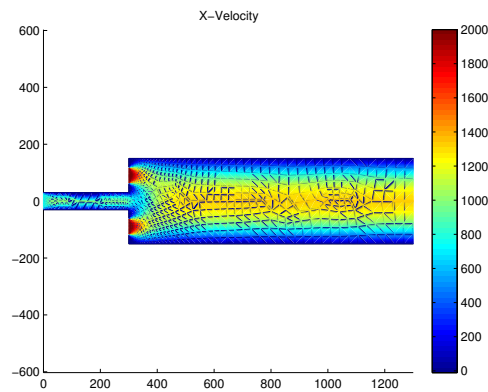
(a) $V_{combustible} = 500 \mu m/s$



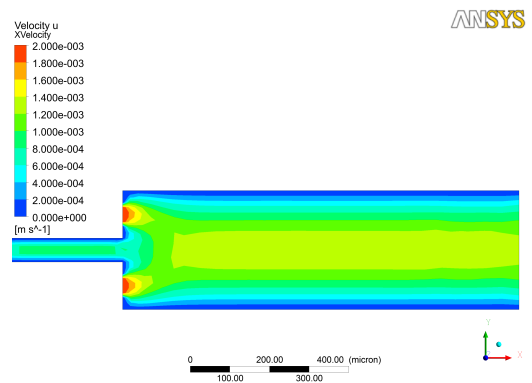
(b) $V_{combustible} = 500 \mu m/s$

Figura 18: Contornos de velocidad en X en microcombustor sin deflectores para $V_{combustible} = 500 \mu m/s$ y $V_{aire} = 2000 \mu m/s$

Por su parte, las figuras 18, 19 y 20 permiten hacer una comparación de los perfiles de velocidad obtenidos mediante la ejecución del solucionador del método de Elementos de Frontera, así como el caso solucionado mediante ANSYS. Esto nos permite realizar una validación de los resultados obtenidos mediante el método numérico BEM con los resultados arrojados por ANSYS.



(a) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$



(b) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$

Figura 19: Contornos de velocidad en X en microcombustor sin deflectores para $V_{combustible} = 750 \mu m/s$ y $V_{aire} = 2000 \mu m/s$

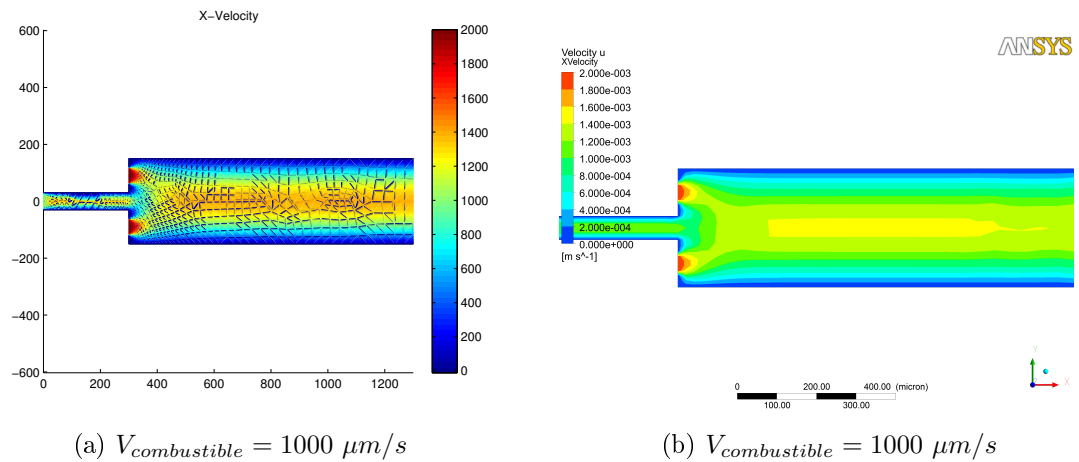


Figura 20: Contornos de velocidad en X en microcombustor sin deflectores para $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$ y $V_{aire} = 2000 \mu m/s$

Los perfiles de velocidad ilustrados en las figuras 18, 19 y 20 se ven muy similares, teniendo en cuenta los resultados al ejecutar el programa de BEM mediante el uso de MATLAB y los obtenidos mediante ANSYS Fluent. Y en efecto lo son, debido a que se presenta el mismo fenómeno físico y se alcanzan valores de velocidad muy similares al ejecutar ambas simulaciones. Se corroboran las condiciones de frontera al ingreso a la cámara de combustión, así como a la salida de la misma, donde se presenta un flujo completamente desarrollado. Por su parte, es interesante observar cómo en toda la frontera exterior se presentan valores de velocidad en la dirección X muy cercanos a cero, lo cual indica que los valores de frontera asignados se están cumpliendo durante la ejecución de la simulación. Debido a que los gases pasan de una sección menor a una sección mayor, se evidencia una disminución de la velocidad que se homogeniza en el centro del microcombustor, donde la cámara ilustrada en la figura 18 presenta valores máximos cercanos a los $1200 \mu m/s$. Por su parte, la microcámara ilustrada en la figura 19 nos indica que las velocidades en este punto alcanzan los $1300 \mu m/s$, generando una mayor interacción entre los dos fluidos en contacto. Adicionalmente, en la tercera cámara de combustión los fluidos alcanzan velocidades de hasta $1450 \mu m/s$ al interior, pero en este caso la relación de velocidades se encuentra al 50 %, lo cual podría sugerir una combustión no muy eficiente. Los perfiles de velocidad asociados a este seguimiento de partícula indican que no es una geometría muy adecuada para alcanzar eficiencia de la combustión, debido a que no se presenta un aumento de velocidad significativo que

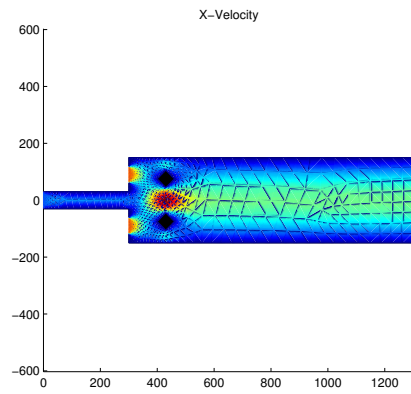
indique mayor interacción en la capa límite de las corrientes, propiciando la mezcla de ambas y una posible reacción.

5.2. Microcombustor con deflector tipo I

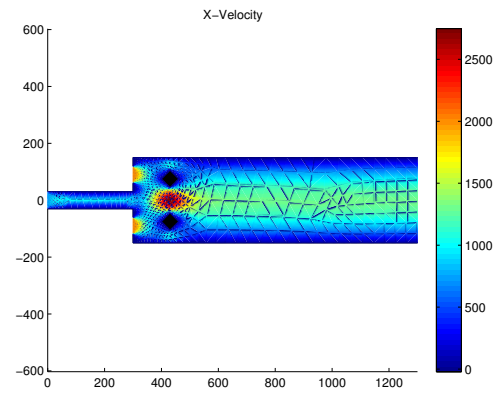
Esta configuración (que puede ser vista en la figura 10b) ofrece un comportamiento muy interesante alrededor de los fenómenos que ocurren al interior de la microcámara de combustión, debido a la ubicación y forma de los deflectores. Inicialmente es posible ver en la figura 21 los perfiles de velocidad obtenidos para las diferentes velocidades de entrada de la corriente de combustible. Igual que en el caso anterior, se observa una fase de descompresión de las corrientes de fluido cuando ingresan a la microcámara de combustión, sin embargo el comportamiento es muy particular cuando entran en contacto con los deflectores, puesto que dada la geometría de los mismos, obligan a ambas corrientes a pasar por una sección de área bastante reducida, haciendo que la velocidad se incremente notablemente y que se favorezcan las interacciones entre las corrientes, pero al no ocupar un volumen significativo del reactor, los tiempos de residencia no se ven grandemente afectados.

De manera análoga, en sección ubicada entre los deflectores, es posible observar como la velocidad de las corrientes aumenta drásticamente, indicando un punto en el cual podría darse una reacción de combustión y en el cual podría generarse una mezcla apropiada de los dos fluidos.

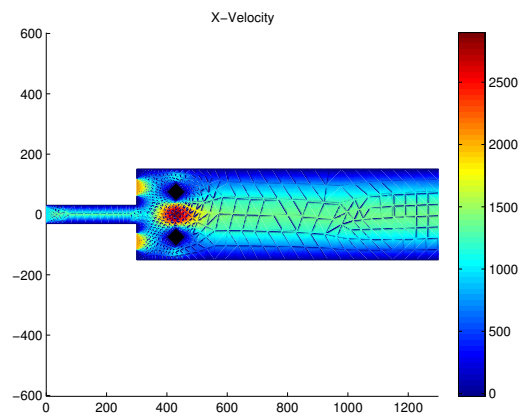
Por su parte, la figura 22 enseña el campo de velocidades que se obtienen al simular el comportamiento de los fluidos al ingresar a la cámara de microcombustión con los parámetros descritos anteriormente. Se observa aglomeración de los vectores de velocidad en la parte intermedia entre los deflectores rómbicos que se han dispuesto. La presencia de tantos vectores en diversas direcciones indica que las corrientes de aire y combustible, al verse obligadas a cambiar su dirección debido a la acción de los deflectores y al tránsito de la misma cantidad de masa por un área mucho más pequeña, se ven obligadas a aumentar su velocidad y por ende a generar una mayor interacción entre ellas. Después de este instante, se observa de nuevo la expansión de la corriente para llenar todos los espacios de la microcámara de combustión y de nuevo homogenizar la velocidad con la que recorrerá toda la longitud. El hecho de que los vectores cercanos a las paredes del microcombustor sean mucho menores que los que se encuentran a lo largo



(a) $V_{combustible} = 500 \mu m/s$



(b) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$



(c) $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$

Figura 21: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo I

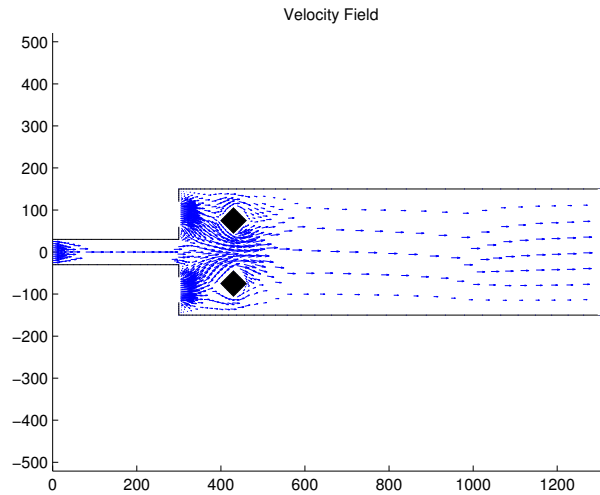
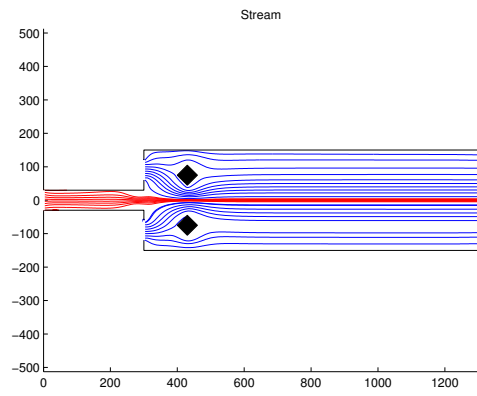


Figura 22: Campo de velocidad en microcombustor Tipo I

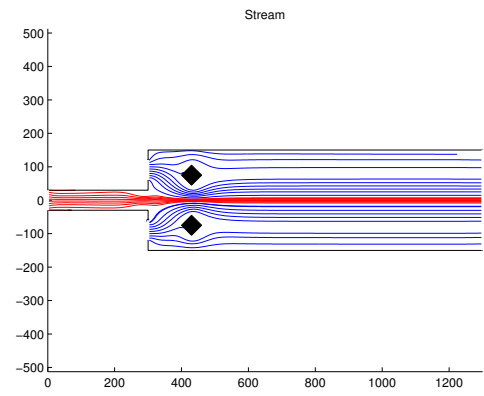
del eje central, son indicios de que el flujo se encuentra completamente desarrollado. De manera similar al caso anterior, los puntos en los cuales no se pierde la continuidad de los vectores de velocidad y se observa una menor densidad que no es producto de los fenómenos físicos que al interior suceden, son debido a deficiencias en la calidad de malla, por no ser muy refinada.

El seguimiento de partícula en el caso del microcombustor Tipo I presenta un comportamiento más detallado de los fluidos al interior de la microcámara. En la figura 23 se muestra como las corrientes de aire (independiente de la velocidad del combustible) buscan su camino al rededor de los dos deflectores y obligan el estrangulamiento de la corriente de combustible, tanto que esta empieza a generar un cuello aún desde antes de entrar a la cámara principal. Con este comportamiento se debe ser muy cuidadoso puesto puede indicar que hay mezcla de las corrientes antes de que el combustible entre a la cámara de combustión gracias a la presencia de aire en esta sección. Sin embargo, en este caso no sucede puesto que el campo de velocidades no presenta vectores de velocidad en dirección negativa a la salida de la corriente de combustible.

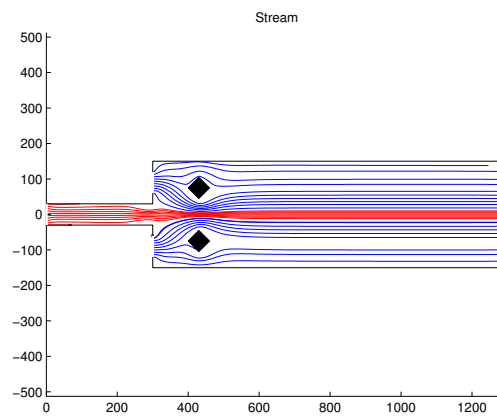
Se evidencia además como en la figura 23a la corriente de combustible se ve más comprimida por las corrientes de aire a la hora de pasar en medio de los deflectores que



(a) $V_{combustible} = 500 \mu m/s$



(b) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$



(c) $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$

Figura 23: Seguimiento de partícula en microcombustor Tipo I

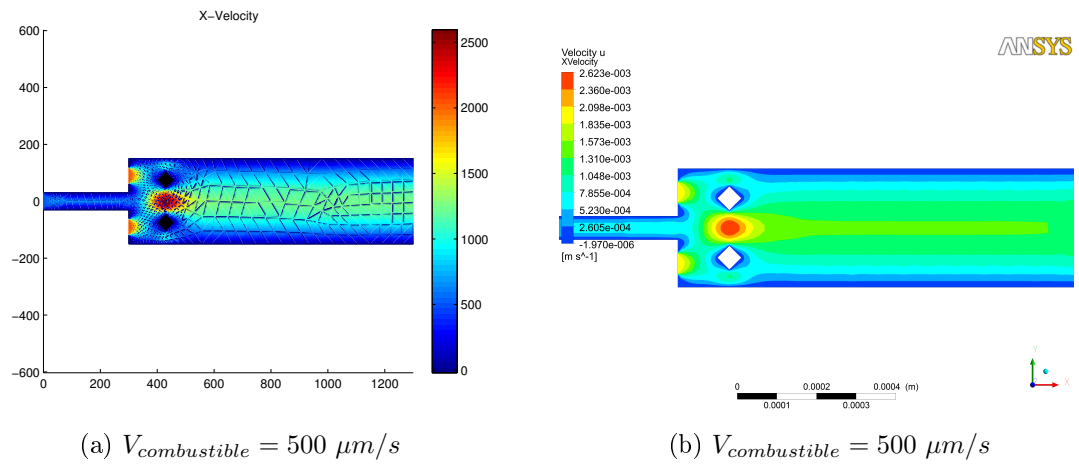
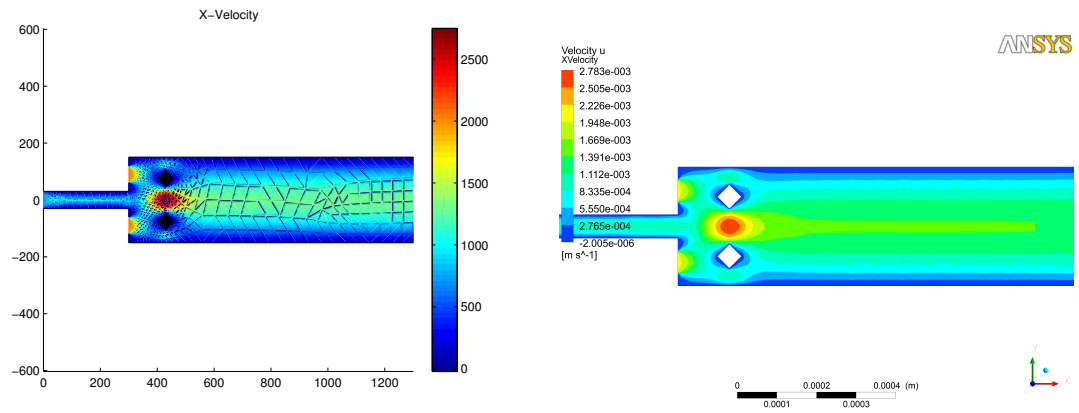


Figura 24: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo I para $V_{combustible} = 500 \mu m/s$ y $V_{aire} = 2000 \mu m/s$

en las figuras 23b y 23c. De igual manera, el hecho de que las corrientes de aire puedan comprimir más la corriente de combustible tiene efectos después de superada la región de los microcombustores, debido a que estas van a sufrir de nuevo una descompresión y una homogenización de las velocidades, y esta en parte dependerá de este fenómeno.

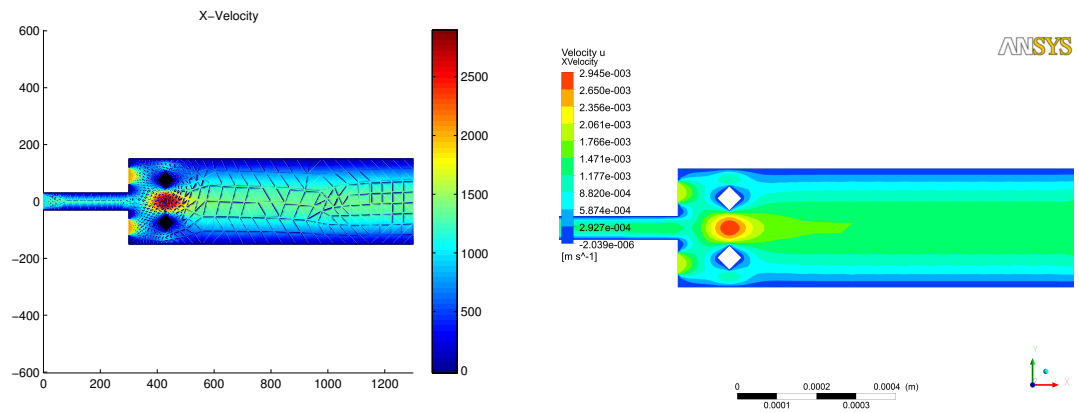
En las figuras 24, 25 y 26 se observan de nuevo los campos de velocidad para cada una de las velocidades analizadas mediante la ejecución del programa de BEM, así como las obtenidas mediante la simulación en ANSYS Fluent. Es muy interesante ver cómo se cumplen las condiciones de frontera en todos los casos, tanto los valores muy cercanos a cero en las paredes del microcombustor, así como en las superficies de los deflectores. Igualmente, se corrobora que los valores de velocidad en los puntos críticos del microcombustor de la figura 24 son congruentes y adicionalmente se recalca que la velocidad máxima alcanzada oscila entre los $2500 \mu m/s$ y los $2600 \mu m/s$, valores que corresponden inclusive a más de las velocidades iniciales del fluido. Esta característica indica que mediante el uso de deflectores aparte de generar cambio en la dirección de los fluidos, es posible aumentar la velocidad de los mismos con la finalidad de propiciar la interacción entre los límites de sus dominios y generar situaciones ideales para una reacción química. Igualmente en el caso en que la velocidad del combustible corresponde a $V_{combustible} = 750 \mu m/s$, se evidencian aumentos de la velocidad en la región ubicada en medio de los microcombustores, alcanzando velocidades de hasta $2750 \mu m/s$. De



(a) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$

(b) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$

Figura 25: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo I para $V_{combustible} = 750 \mu m/s$ y $V_{aire} = 2000 \mu m/s$



(a) $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$

(b) $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$

Figura 26: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo I para $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$ y $V_{aire} = 2000 \mu m/s$

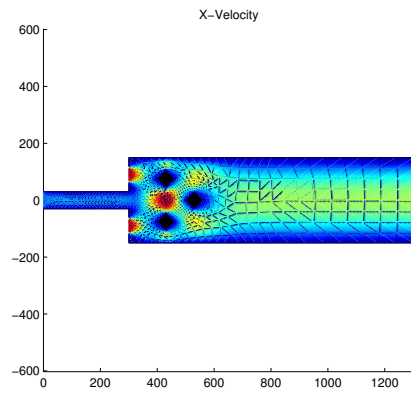
forma análoga se evidencia en la figura 26 como la velocidad en este punto alcanza casi los $3000 \mu m/s$, validando la hipótesis de que los deflectores pueden ayudar a generar condiciones más favorables de interacción entre ambas corrientes de fluido, que bajo las condiciones de flujo actuales, tienen un comportamiento muy particular debido a su excesiva laminaridad.

5.3. Microcombustor con deflector tipo II

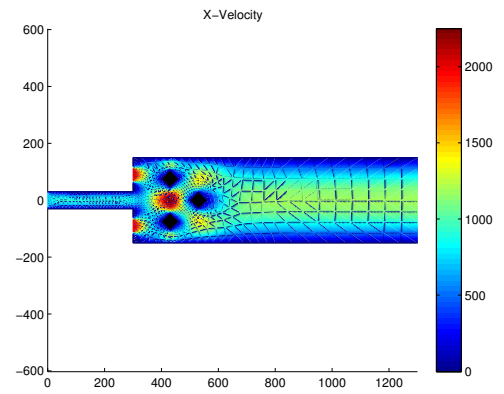
En la figura 10c es posible identificar la disposición de los tres deflectores al interior de la microcámara de combustión. Igualmente, es de esperarse que el comportamiento antes del tercer deflector sea muy similar al presentado por el microcombustor con deflector tipo I, en el cual los dos deflectores obligaban a las corrientes de aire a cambiar su dirección, llevándolas hacia el eje central del microcombustor y forzando un aplastamiento de la corriente de combustible, haciendo que la misma adquiriera una velocidad mayor. Precisamente la idea de ubicar este tercer deflector en esta parte consiste en generar de nuevo un cambio en la dirección de las corrientes de aire y de combustible, haciendo que interactúen una mayor distancia a lo largo del microcombustor y que se tenga presencia de ambas corrientes en toda la cámara.

Los perfiles de velocidad de los tres microcombustores se muestran en la figura 27, donde se puede identificar el efecto del tercer deflector agregado a la microcámara de combustión. Se genera igualmente una región donde los fluidos se aceleran debido a la reducción del área de flujo, pero inmediatamente después de pasar por esa región se ven obligados a cambiar la dirección que llevan debido a que se encuentran con el tercer deflector. Este fenómeno se observa mejor en la figura 28.

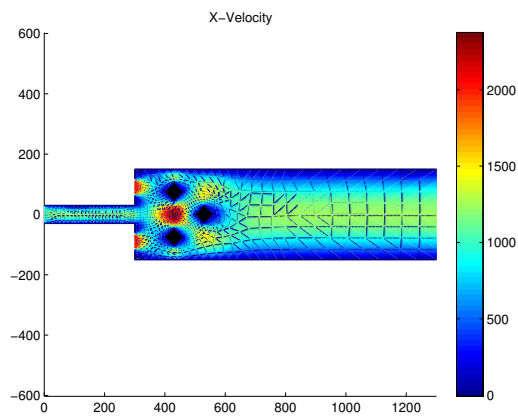
El campo de velocidades generado bajo esta configuración no es muy diferente para los tres casos en los que se varía la velocidad de acceso de la corriente de combustible. Es muy interesante ver cómo los vectores de velocidad se hacen más grandes en magnitud a medida que se acercan a la región entre los dos primeros deflectores y cómo cambian su dirección para evadir el tercer deflector. Este tercer deflector sirve igualmente como elemento desacelerante, puesto que a medida que las diferentes corrientes alcanzan este punto al interior del microcombustor, la magnitud de la velocidad disminuye pero se ha logrado el objetivo que es precisamente incitar las moléculas de combustible para que interactúen con las moléculas de aire, y generar las condiciones necesarias para que



(a) $V_{combustible} = 500 \mu m/s$



(b) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$



(c) $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$

Figura 27: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo II

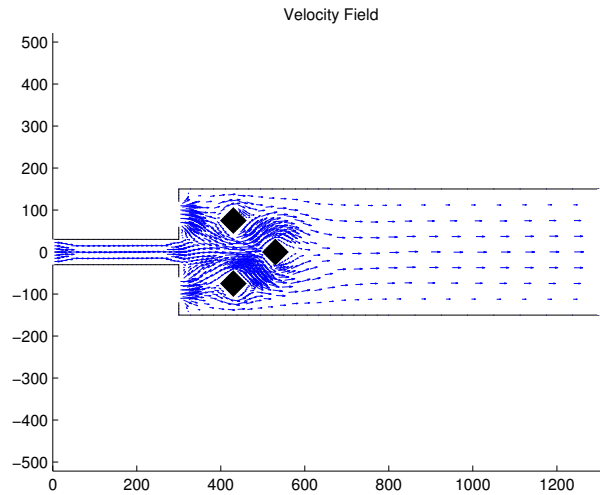


Figura 28: Campo de velocidad en microcombustor Tipo II

una reacción de combustión pueda ocurrir. También se evidencia un flujo desarrollado cuando los fluidos superan la sección de deflectores puesto que la magnitud de los vectores cercanos a las paredes es menor que la de aquellos que se encuentran más cercanos al eje central de la cámara. Debido a la concentración de estos fluidos en esa región, se puede pensar en ubicar una fuente de calor justo sobre las paredes de los deflectores que inicie la reacción de combustión debido a que en este punto la interacción entre las moléculas de ambos fluidos es elevada y esto es lo necesario para catalizar la reacción.

En el seguimiento de partícula correspondiente a la figura 29 se observa con claridad la función del tercer deflector dentro del sistema interno del microcombustor. Es evidente como las corrientes de aire y combustible se ven inicialmente obligadas a circular por una sección pequeña, haciendo que se acerquen lo más posible y posteriormente al encontrarse con el deflector cambian su trayectoria para desviar al deflector, incrementando la longitud de contacto entre ambas corrientes y por ende su interacción con fines de promover la combustión. Se comienzan a observar las primeras regiones de recirculación, muy cerca a los accesos de aire y en muy pequeñas dimensiones, pero este efecto es interesante porque puede ceder al inicio de regiones donde las corrientes podrían mezclarse de forma evidente y con facilidad. Cuando la velocidad de acceso del combustible corresponde a $500 \mu\text{m}/\text{s}$ se observa que el cuello formado es bastante

delgado, a diferencia de los casos en los que la velocidad es de 750 y 1000 $\mu\text{m}/\text{s}$, donde esta región se hace un poco más grande, obligando al aire a circular por otras regiones del microcombustor.

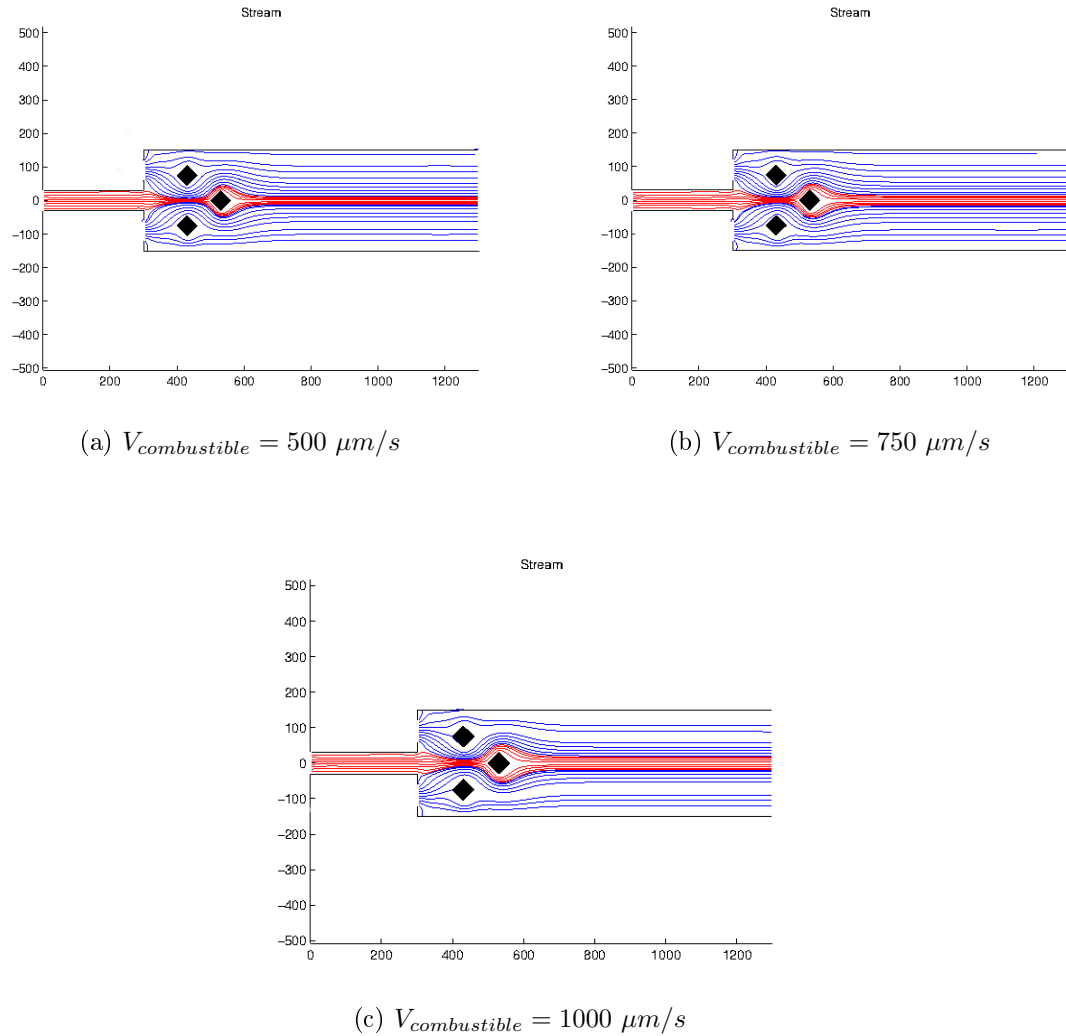


Figura 29: Seguimiento de partícula en microcombustor Tipo II

En las imágenes 30, 31 y 32 se observan de nuevo los campos de velocidad correspondientes a cada uno de los sistemas analizados, en comparación con los resultados obtenidos mediante el software comercial ANSYS Fluent. Se identifica claramente que para los tres casos los perfiles de velocidad son similares, indicando que es posible simular el fenómeno por ambos métodos y obtener resultados acordes. En el caso en que

la velocidad de acceso del combustible a la microcámara de combustión corresponde a $500 \mu\text{m}/\text{s}$ se identifican ascensos en la velocidad de las corrientes en la región de deflectores, sin embargo estos valores no presentan tanta similitud en ambas simulaciones como en los casos anteriores, puesto que en el caso de la simulación por BEM los valores máximos no alcanzan a llegar a los $2200 \mu\text{m}/\text{s}$ mientras que los resultados arrojados por ANSYS indican velocidades de hasta $2350 \mu\text{m}/\text{s}$. De forma similar se ve en la figura 31, donde la velocidad en la región de deflectores se encuentra cercana a los $2300 \mu\text{m}/\text{s}$ mediante BEM y los datos que presenta ANSYS indican un máximo que oscila por los $2450 \mu\text{m}/\text{s}$. Historia similar se evidencia en el tercer caso, cuando la velocidad de acceso de la corriente de combustible corresponde a $1000 \mu\text{m}/\text{s}$, puesto que en esta región donde se presenta la aceleración de las corrientes, ANSYS reporta velocidades del orden de $2635 \mu\text{m}/\text{s}$ mientras que mediante el método numérico implementado los valores permanecen levemente por debajo, notificando velocidades inferiores a los $2500 \mu\text{m}/\text{s}$.

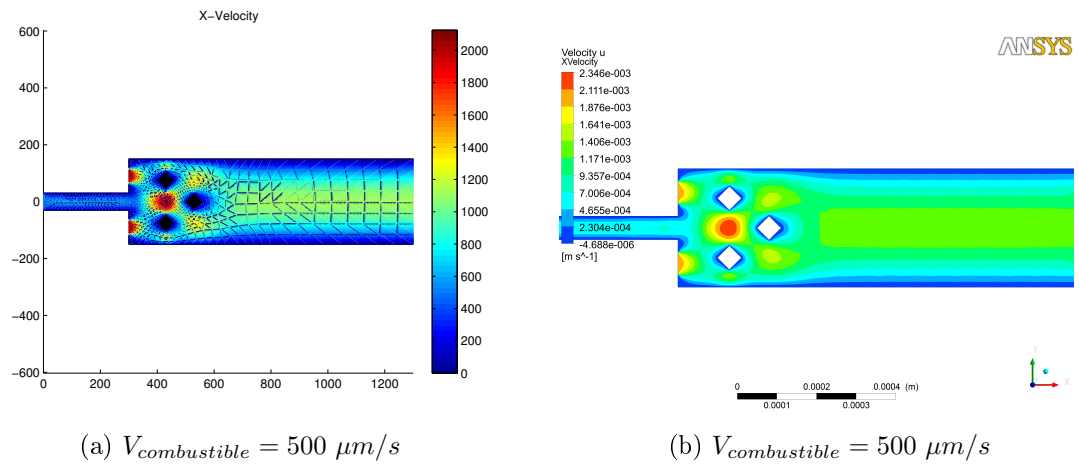


Figura 30: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo II para $V_{combustible} = 500 \mu\text{m}/\text{s}$ y $V_{aire} = 2000 \mu\text{m}/\text{s}$

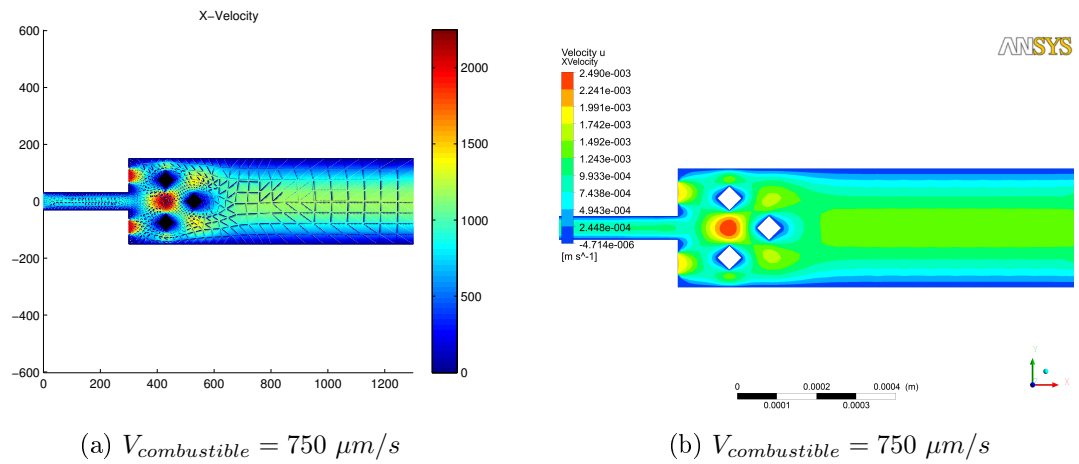


Figura 31: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo II para $V_{combustible} = 750 \mu m/s$ y $V_{aire} = 2000 \mu m/s$

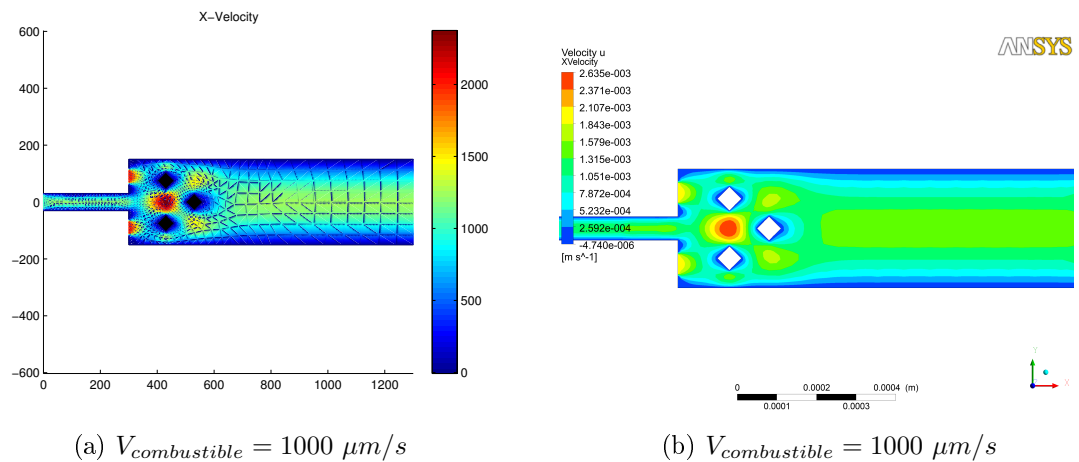


Figura 32: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo II para $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$ y $V_{aire} = 2000 \mu m/s$

Adicionalmente, en las simulaciones realizadas con ANSYS se observa la región de bajas velocidades (cercanas a las paredes) después de los deflectores como un área más delgada que como se presenta en las simulaciones por BEM. Estas diferencias si bien son significativas, no nos cohiben de identificar el fenómeno que está sucediendo al interior de los microcombustores bajo esta configuración, puesto que los seguimientos

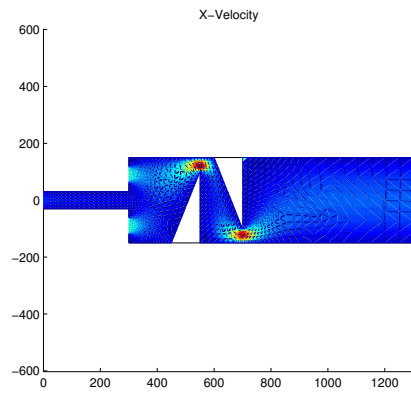
de partícula y el campo de velocidad igualmente entregan información relevante. Estos problemas en las diferencias de los valores de la velocidad por ambos métodos se deben probablemente a problemas de calidad de malla, puesto que como se ve en la figura 11c, las restricciones de número de nodos impuesta por el mallador nos evita refinar las mallas de estos microcombustores donde el flujo es un poco más complejo y puede dar pie a imprecisiones como las que se han demostrado.

5.4. Microcombustor con deflector tipo III

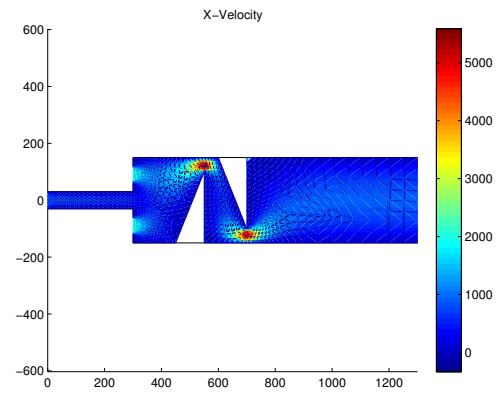
El microcombustor con deflector tipo III presenta una alternativa de distribución de los deflectores diferente a la que se había propuesto en los tres casos anteriores. En este caso no se presentan deflectores rómbicos, sino que se modifica la estructura interna de los microcombustores para obligar al fluido a recorrer una mayor distancia antes de salir de la cámara y de igual manera se restringe el área de flujo en algunos sectores para hacer que el fluido aumente su velocidad y se potencialice la interacción entre las moléculas de las dos corrientes. Esta geometría puede verse en la figura 10d.

La figura 33 presenta los perfiles de velocidad en dirección X para el microcombustor con deflectores triangulares en posiciones opuestas descrito anteriormente. Este perfil de velocidad es muy interesante porque nos muestra inicialmente dos puntos de alta velocidad dispuestos de forma serial, por donde toda partícula del fluido debe pasar antes de salir del microcombustor. Dependiendo de la velocidad de entrada de la corriente de combustible, se obtendrán valores diferentes de velocidad en estos puntos de alta presión, alcanzándose velocidades en X que doblan en magnitud a las velocidades de entrada de las corrientes. Por ejemplo, en la figura 33a se observa el comportamiento de la velocidad en X para el microcombustor con velocidad de entrada de combustible equivalente a $500 \mu m/s$, y se identifican ambas regiones de aceleración del fluido con velocidades de hasta $5000 \mu m/s$. En el caso en que el combustible ingresa a $750 \mu m/s$, la velocidad en estas dos regiones aumenta hasta casi los $5500 \mu m/s$, mientras que en el caso en que la velocidad de entrada del combustible es $1000 \mu m/s$, las regiones de alta velocidad registran magnitudes de casi $6000 \mu m/s$.

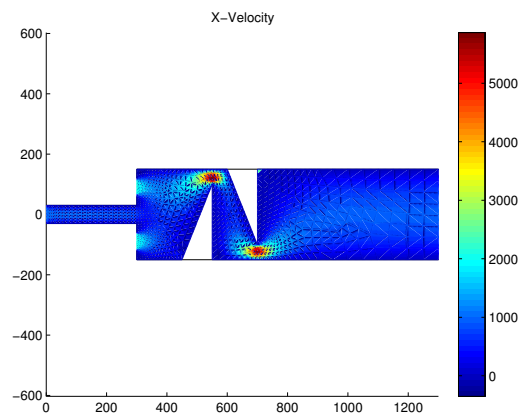
El campo de velocidades introduce también información valiosa alrededor del comportamiento de los fluidos al interior de la cámara de combustión. En este caso se observa la expansión inicial de los gases justo cuando ingresan a la cámara e inmediata-



(a) $V_{combustible} = 500 \mu m/s$



(b) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$



(c) $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$

Figura 33: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo III

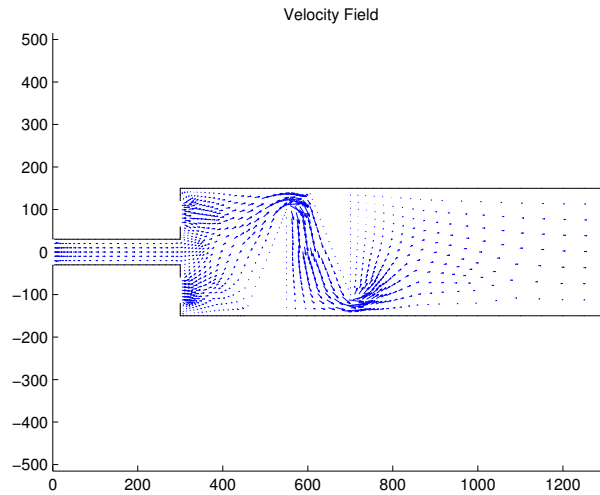


Figura 34: Campo de velocidad en microcombustor Tipo III

mente se ven obligados a transitar por una región estrecha en la parte superior dadas las restricciones geométricas de microcombustor. La corriente de aire de la parte superior no tiene mayor problema para pasar por allí, pero la corriente de la parte superior primero llena la cavidad que se genera en el fondo y posteriormente busca salida vía el espacio pequeño de la parte superior, comprimiendo la corriente de combustible a su paso y produciendo un aumento en la velocidad de ambos fluidos. Ambos puntos en donde cambia la dirección de los fluidos presentan vectores de velocidad en diferentes direcciones, lo cual indica que en estos lugares podrían generarse vórtices que favorecen la mezcla de los dos fluidos. Superados estos obstáculos, se llega al plenum de la cámara de combustión, donde se presenta un flujo desarrollado y donde los fluidos ocupan todo el espacio de la cámara, simbolizado en vectores de velocidad de diferentes magnitudes, con mayores valores en el centro y menores en las partes cercanas a las paredes.

De manera similar se muestra el seguimiento de partícula a las dos corrientes que acceden al microcombustor. En el primer caso se identifica el combustible que accede a la cámara pero como su velocidad es apenas un 25% de la velocidad de la corriente de aire, esta corriente es fácilmente comprimida por el aire, tanto que su paso por los deflectores y a través de la microcámara es bastante restringido.

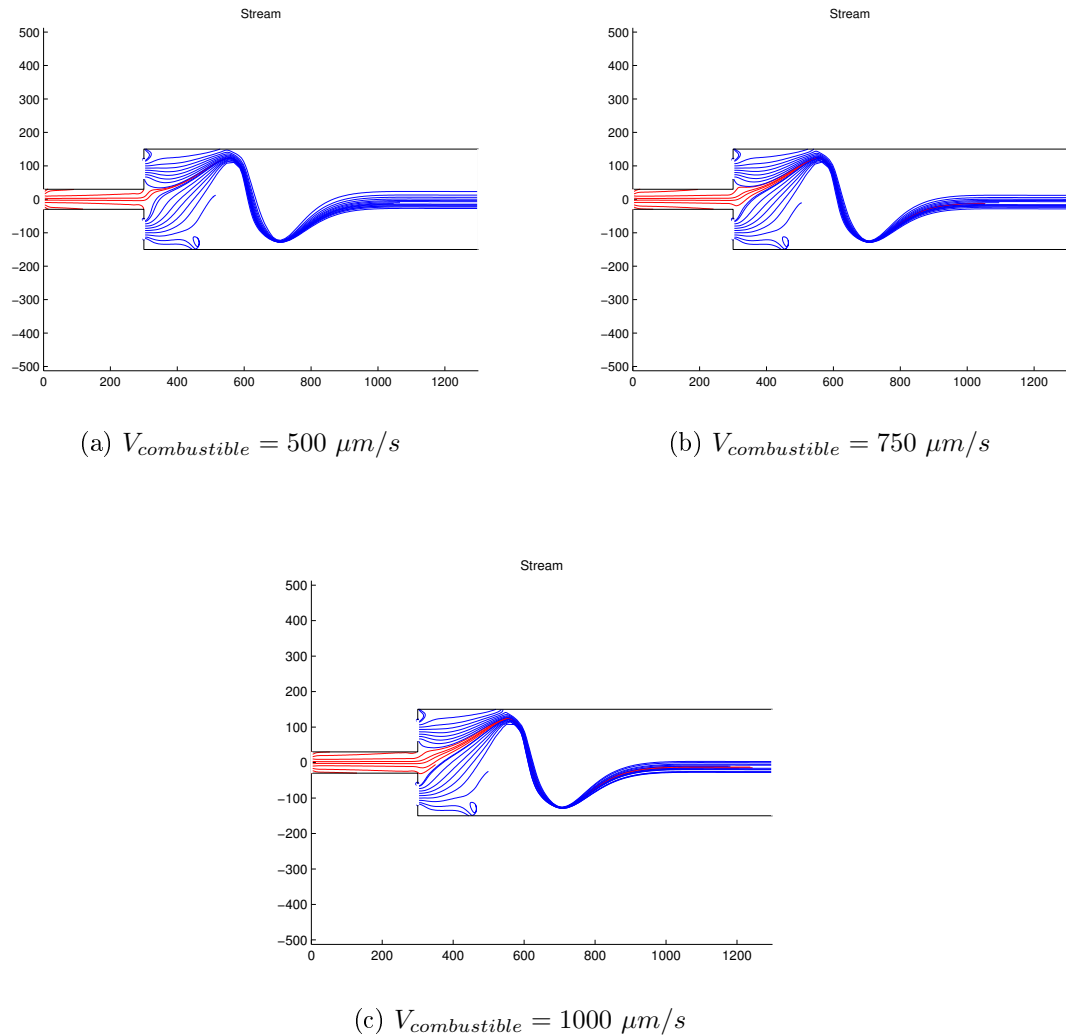


Figura 35: Seguimiento de partícula en microcombustor Tipo III

Igualmente se observan regiones de recirculación en la parte inferior, pero aparentemente sólo de la corriente de aire, lo cual indica que en ese lugar el contenido total corresponde a aire. En el caso en que $V_{combustible} = 750 \mu m/s$, se observa la forma en que la velocidad incide en la interacción de las dos corrientes, puesto que la restricción para el tránsito por la microcámara no es tan grande, y se alcanza a ver parte de la corriente de combustibles aguas abajo de la región de deflectores. Por su parte, cuando $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$, la corriente de combustibles se hace más ancha y mayor cantidad de fluido pasa a través de los deflectores y alcanza el final de la cámara. La interacción entre ambas corrientes se da en una longitud mayor que en los casos ante-

riores gracias al efecto de desviación de los deflectores, y como ya se conocen los puntos de aceleración de las corrientes, podría pensarse en colocar los puntos calientes justo en las puntas de los deflectores y sobre toda la línea inclinada del segundo deflector. Esto podría facilitar la generación de una reacción química.

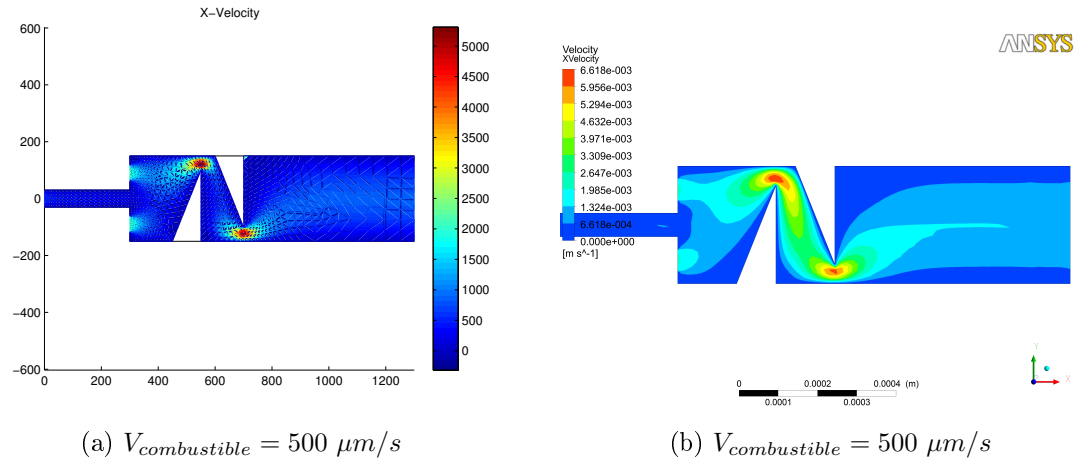
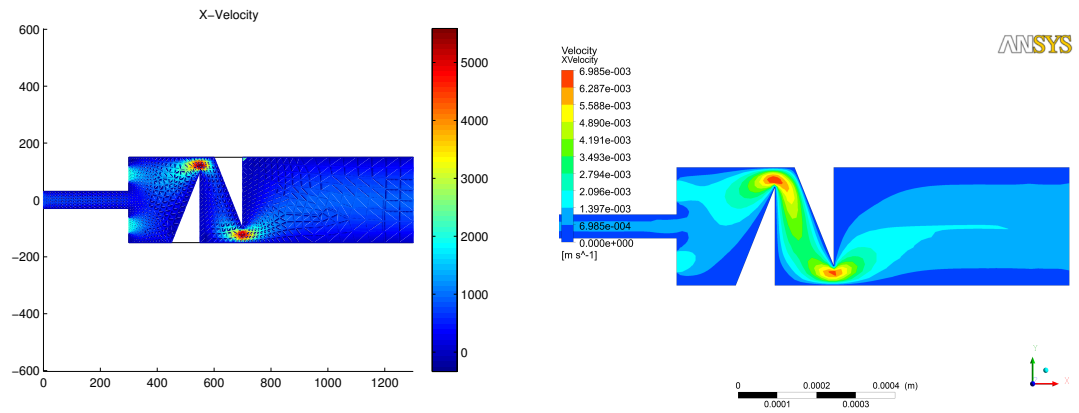


Figura 36: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo III para $V_{combustible} = 500 \mu m/s$ y $V_{aire} = 2000 \mu m/s$

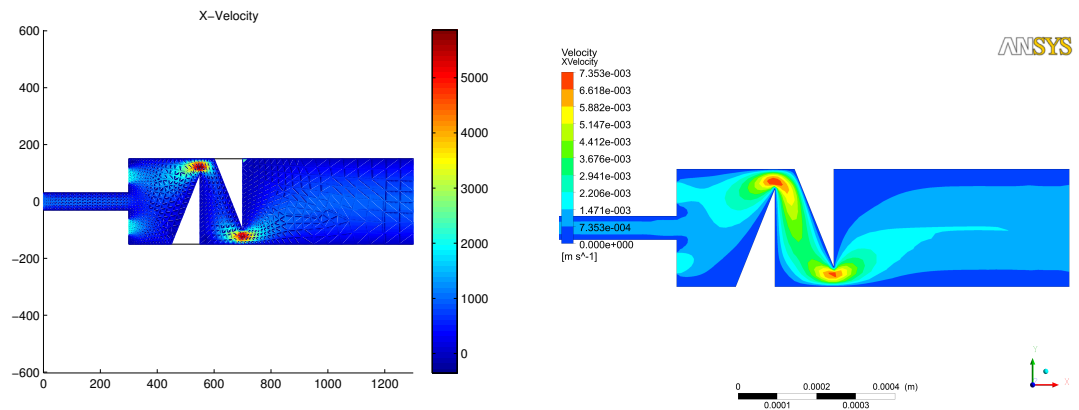
En las figuras 36, 37 y 38 se observan en paralelo los perfiles de velocidad obtenidos por BEM y ANSYS, respectivamente. Se corrobora que los perfiles de velocidad obtenidos mediante ambos métodos son similares e implican que el fenómeno puede ser simulado por cualquiera de los dos métodos, sin embargo se tiene problema de nuevo con los valores de velocidad obtenidos, puesto que los reportados por ANSYS son ligeramente mayores que los obtenidos mediante el uso de Elementos de Frontera. Problemas que seguramente están asociados a la calidad de las mallas. La figura 36 muestra los perfiles de velocidad cuando $V_{combustible} = 500 \mu m/s$. Allí se corroboran las condiciones de frontera establecidas como parámetros para las simulaciones y adicionalmente se ve la similitud de ambos perfiles. Las velocidades máximas que alcanza esta configuración en la parte donde el área de flujo se reduce son menores a $5500 \mu m/s$, mientras que en el caso ANSYS corresponden a aproximadamente $6600 \mu m/s$. Cuando $V_{combustible} = 750 \mu m/s$, la velocidad en los puntos críticos asciende a casi $7000 \mu m/s$ mediante la simulación por ANSYS, sin embargo el resultado por BEM no alcanza aún los $5500 \mu m/s$. En el caso en que la velocidad de la corriente de combustible alcanza el 50 % de la velocidad de la corriente de aire, los valores de velocidad en los puntos donde se presenta la aceleración



(a) $V_{combustible} = 750 \mu\text{m/s}$

(b) $V_{combustible} = 750 \mu\text{m/s}$

Figura 37: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo III para $V_{combustible} = 750 \mu\text{m/s}$ y $V_{aire} = 2000 \mu\text{m/s}$



(a) $V_{combustible} = 1000 \mu\text{m/s}$

(b) $V_{combustible} = 1000 \mu\text{m/s}$

Figura 38: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo III para $V_{combustible} = 1000 \mu\text{m/s}$ y $V_{aire} = 2000 \mu\text{m/s}$

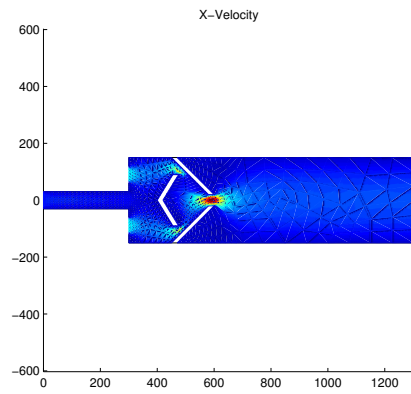
de los fluidos suben alrededor de $7300 \mu\text{m}/\text{s}$ cuando la simulación se realiza por medio de ANSYS, sin embargo en el caso del método de Elementos de Frontera, este valor apenas se acerca a los $6000 \mu\text{m}/\text{s}$. Si bien esta diferencia es significativa, es evidente el aumento de la velocidad mediante el uso de este tipo de deflectores y la generación de posibles puntos donde se podría propiciar la reacción de combustión.

5.5. Microcombustor con deflector tipo IV

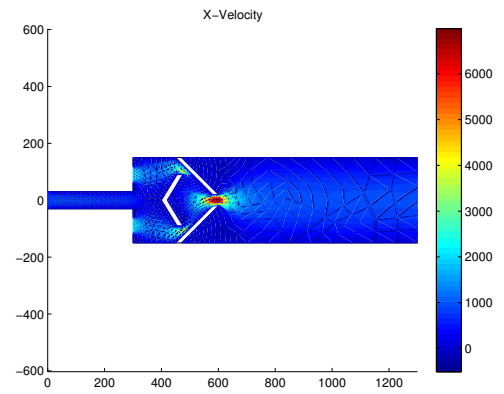
El microcombustor ilustrado en la figura 10e muestra el diseño del deflector tipo IV. Este sistema consiste en un deflector central que tiene el objetivo de dividir la corriente de combustible y obligarla a que se separe y busque las dos corrientes de aire que se encuentran a sus lados. Posteriormente hay un par de deflectores que pretenden generar una zona de recirculación de los fluidos y que confinen las corrientes a un espacio mucho más reducido para que aumenten su velocidad antes de la expansión final en la cámara de combustión.

Tal como se muestra en la figura 39, los perfiles de velocidad obtenidos son bastante particulares, pero dan prueba de lo que se había pensado inicialmente cuando se diseñó este tipo de deflectores. Efectivamente se genera una zona donde las corrientes se confinan y aumentan dramáticamente su velocidad, propiciando la interacción entre las moléculas de aire y combustible presentes en la microcámara, así como también se generan zonas donde es posible una recirculación de los fluidos, como la parte interior del primer deflector. Los contornos de velocidad no varían mucho entre sí, tan sólo en las magnitudes de la velocidad alcanzada en el punto diseñado para acelerar los fluidos. También se ve claramente como la corriente de combustible se expande justo a la entrada del microcombustor, evitando que las corrientes de aire alcancen el centro de la microcámara, haciéndolas ir en dirección de las paredes y obligándolas a pasar por los pequeños espacios anteriores al segundo deflector. En las gráficas de seguimiento de partícula se observa con mayor claridad el fenómeno que se presenta al interior del microcombustor.

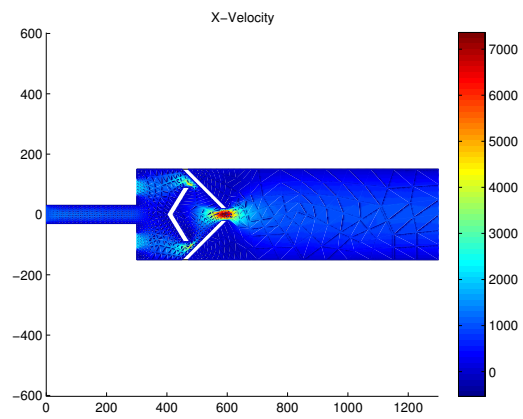
Por otra parte, el campo de velocidades para esta configuración, ilustrado en la figura 40 entrega información bastante importante a la hora de analizar la dinámica al interior del microcombustor. Inicialmente se observa como los vectores de velocidad de



(a) $V_{combustible} = 500 \mu m/s$



(b) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$



(c) $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$

Figura 39: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo IV

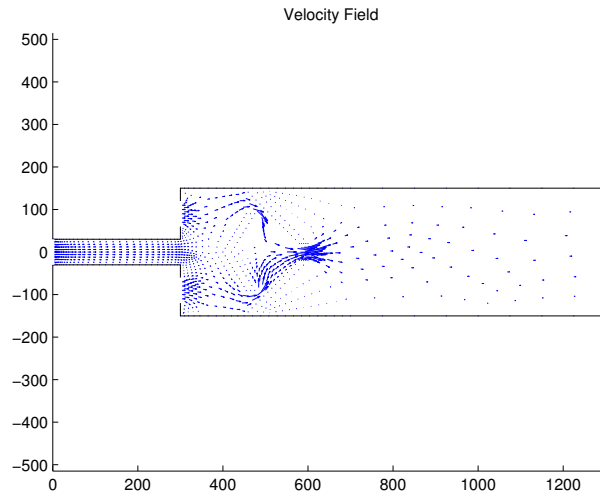
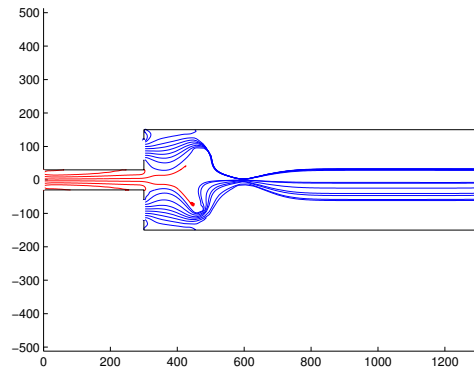


Figura 40: Campo de velocidad en microcombustor Tipo IV

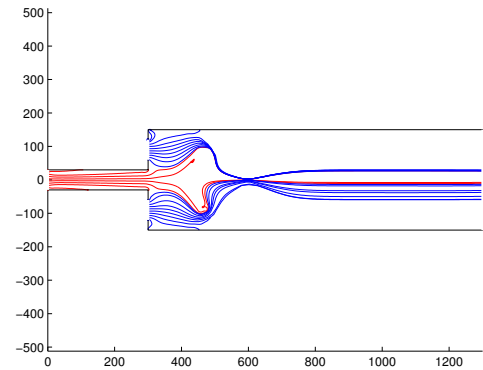
las corrientes de aire tienden a irse hacia el eje central del microcombustor, buscando la corriente de combustible, pero esta última las hace direccionarse hacia las paredes. Igualmente, después de superado el primer deflector es evidente que la mayoría de los vectores continúan su recorrido hacia el extremo del microcombustor; sin embargo, algunos vectores tienden a revertir su dirección, generando una zona de recirculación de fluidos que es ideal para la generación de las condiciones óptimas para la combustión. Una vez se superan los siguientes deflectores, donde se evidencia el aumento en la magnitud de los vectores de velocidad, se observa una zona de expansión caracterizada por la disminución de la magnitud de la velocidad y la distribución de las corrientes en todo el área disponible; sin embargo, debido a que las mallas no son muy refinadas, no es posible observar muy claramente si al final se cuenta con un flujo completamente desarrollado.

El seguimiento de partícula para cada caso se visualiza en la figura 41. El caso inicial, donde $V_{combustible} = 500 \mu m/s$, nos presenta información relevante, puesto que como allí se observa, la corriente de combustible no alcanza a superar el primer deflector y se queda estancada en un punto. Este fenómeno implica que la combustión podría darse aguas abajo del primer deflector, pero hasta ese punto no se garantiza qué tanta interacción ha ocurrido entre las dos corrientes. Bajo estas condiciones, si la combustión

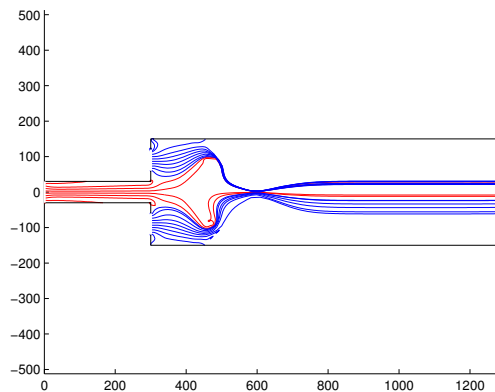
sucede, se perdería en el lugar en el que el combustible se queda, puesto que faltaría este ingrediente esencial en la zona de deflectores y en adelante para poder alcanzar la reacción.



(a) $V_{combustible} = 500 \mu m/s$



(b) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$



(c) $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$

Figura 41: Seguimiento de partícula en microcombustor Tipo IV

Por su parte, la figura 41b muestra que al aumentar la velocidad de la corriente de combustible, se logra que esta supere la región de deflectores exitosamente y garantice que se tendrá combustión al interior de todo el microcombustor. Igualmente, se presenta claramente recirculación de la corriente de combustible justo después de superado el primer microcombustor, indicando que esta zona es ideal para servir de puntos calientes

y ser iniciadores de la reacción química. Este diseño de deflector también aumenta la longitud de contacto de ambas corrientes al interior de la cámara y garantiza que hay una buena interacción entre las mismas, gracias a las velocidades que se alcanzan y a los lugares en los cuales se observan prácticamente una corriente sobre la otra. En la figura 41c se observa el seguimiento a las partículas de aire y combustible al interior de la microcámara de combustión cuando la velocidad de ingreso del combustible es $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$. En este caso se presenta el mismo fenómeno que en el descrito anteriormente debido a que hay presencia de combustible aún después de los deflectores, se presenta una zona de aceleración y confinamiento de los fluidos y adicionalmente se ven algunos indicios de recirculación del combustible recién superado el primer deflector. Pero de manera adicional se observa mayor cantidad de combustible que en el caso anterior. Se debe tener cautela a la hora de tomar decisiones con respecto a esta configuración porque la relación aire/combustible para este caso corresponde a la relación de velocidades de los fluidos al interior de la cámara de combustión, es decir, 50 %, y esto puede implicar problemas de ineficiencia en la combustión.

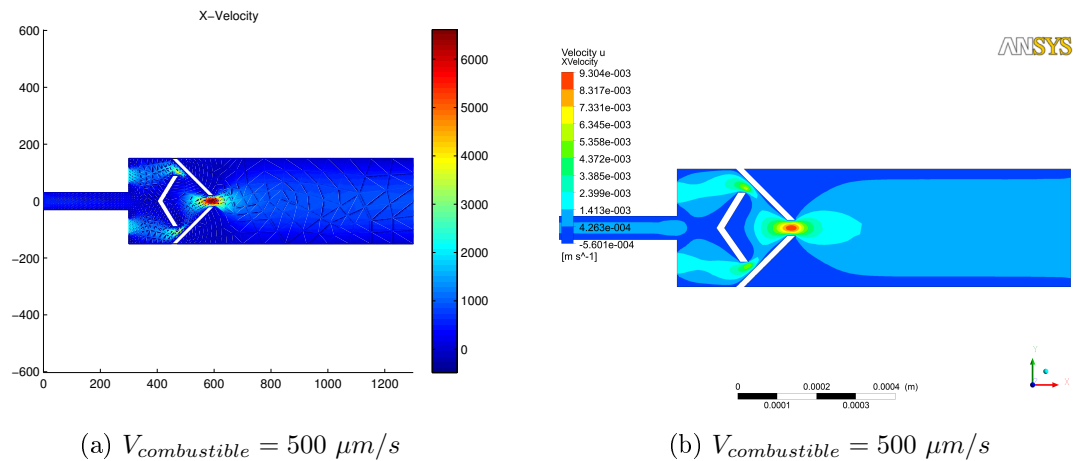
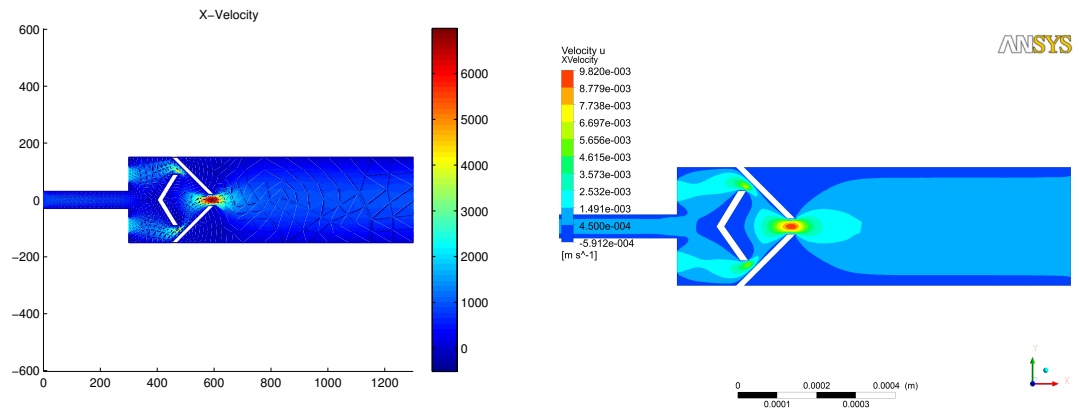


Figura 42: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo IV para $V_{combustible} = 500 \mu m/s$ y $V_{aire} = 2000 \mu m/s$

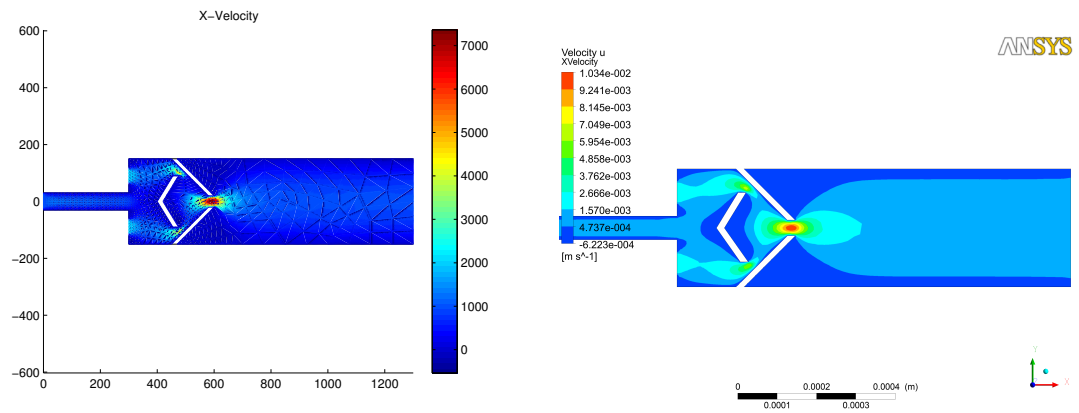
Por otra parte, en las figuras 42, 43 y 44 se muestran los contornos de velocidad obtenidos mediante el método BEM y mediante el uso de ANSYS de forma paralela y es posible compararlos. Se observa que para los tres casos el perfil de velocidad es aparentemente el mismo y de nuevo difiere sólo en los valores de velocidad obtenidos en



(a) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$

(b) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$

Figura 43: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo IV para $V_{combustible} = 750 \mu m/s$ y $V_{aire} = 2000 \mu m/s$



(a) $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$

(b) $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$

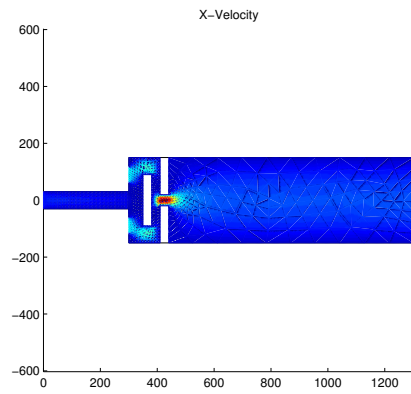
Figura 44: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo IV para $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$ y $V_{aire} = 2000 \mu m/s$

algunos puntos. Para los tres casos es posible identificar tres casos donde las corrientes de combustible y aire aumentan su velocidad significativamente, siendo estos puntos exactamente en la parte superior e inferior del primer microcombustor y en la mitad del segundo microcombustor. El análisis realizado mediante BEM indica que para la figura 42, en los dos primeros puntos la velocidad obtenida alcanza los $4000 \mu\text{m}/\text{s}$ y en el segundo punto se obtiene una velocidad máxima de alrededor de $6500 \mu\text{m}/\text{s}$. Mediante ANSYS se puede identificar que estos valores corresponden a $5400 \mu\text{m}/\text{s}$ y $9300 \mu\text{m}/\text{s}$, respectivamente. Para el segundo caso, en el cual $V_{\text{combustible}} = 750 \mu\text{m}/\text{s}$, se observan igualmente diferencias con respecto a los valores de velocidad al interior del microcombustor, a pesar de que los perfiles son muy similares. El valor cercano a los $4300 \mu\text{m}/\text{s}$ difiere en gran cantidad con los casi $5700 \mu\text{m}/\text{s}$ obtenidos mediante la simulación en ANSYS, así como las velocidades máximas en la parte central del segundo deflector son diferentes entre si puesto que para el caso con BEM corresponde a aproximadamente $7000 \mu\text{m}/\text{s}$, mientras que al caso analizado con ANSYS oscila cerca a los $9800 \mu\text{m}/\text{s}$. Para la tercera variación de la velocidad, correspondiente a $V_{\text{combustible}} = 1000 \mu\text{m}/\text{s}$, el punto de mayor velocidad registra valores superiores a los $7000 \mu\text{m}/\text{s}$, mientras que los presentados por el software comercial superan los $10000 \mu\text{m}/\text{s}$. Estas diferencias tan abismales son de nuevo debido a problemas en la malla utilizada para simular el caso con BEM, puesto que no se encuentra lo suficientemente refinada como para garantizar una mayor precisión en los resultados obtenidos. Una comparación de estas mallas podría hacerse al observar las figuras 11e y 14e.

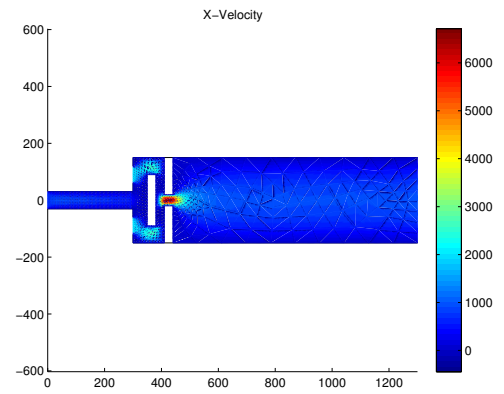
5.6. Microcombustor con deflector tipo V

Con esta configuración de microcombustor, identificado en la figura 10f, se busca analizar el comportamiento de las corrientes de aire y combustible cuando interactúan con deflectores cuyas paredes no se encuentran inclinadas, sino que el encuentro entre el fluido y el sólido se hace de forma perpendicular a la superficie, en aras de determinar si esta interacción favorece un comportamiento turbulento de los fluidos o la generación de vórtices donde se favorezca la mezcla de ambas corrientes.

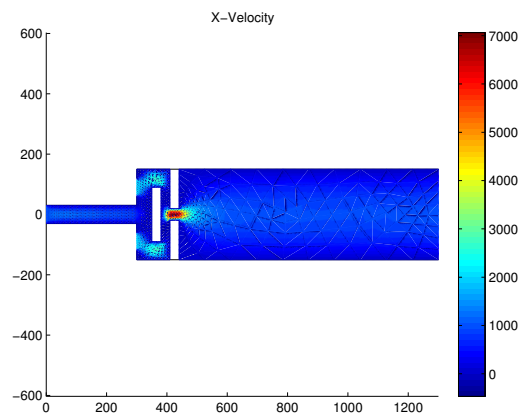
En la figura 45 se puede observar los contornos de velocidad correspondientes al diseño de este microcombustor, bajo las diferentes velocidades de acceso de combustible: $500 \mu\text{m}/\text{s}$, $750 \mu\text{m}/\text{s}$ Y $1000 \mu\text{m}/\text{s}$. Estos perfiles no entregan mucha información con respecto al comportamiento de la corriente de aire, sin embargo ilustran lo suficiente



(a) $V_{combustible} = 500 \mu m/s$



(b) $V_{combustible} = 750 \mu m/s$



(c) $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$

Figura 45: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo V

sobre las corrientes de aire, las cuales pierden velocidad al ingresar a la cámara y tienden a dirigirse hacia el centro del microcombustor pero desvían su trayectoria hacia las paredes del microcombustor para evadir el primer deflector. Posteriormente se registra un punto donde la velocidad aumenta considerablemente con respecto al resto del sistema, ubicado en medio del segundo deflector. En este punto los fluidos se aceleran y se propicia la interacción entre ambas corrientes. Este comportamiento es bastante similar al exhibido por el microcombustor con deflectores Tipo IV. En la gráfica correspondiente al seguimiento de partícula se podrá ver con más detalle el comportamiento de cada corriente al interior de la microcámara.

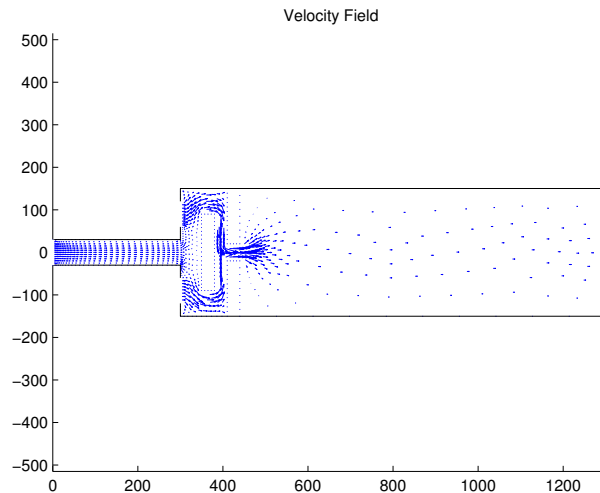


Figura 46: Campo de velocidad en microcombustor Tipo V

El campo de velocidades, descrito en la figura 46, presenta los vectores de velocidad durante todo el dominio del microcombustor, identificándose una zona de altas velocidades evidenciada por la presencia de vectores de velocidad de gran magnitud y adicionalmente en diversas direcciones, lo cual genera indicios de que esta región, anterior al segundo deflector, puede ser una buena zona para la interacción entre ambas corrientes. Además a este comportamiento, se observa la expansión de los fluidos por toda la cámara de combustión recién se supera la zona de deflectores, generando un espacio donde la combustión podría continuarse sin ningún inconveniente.

Una imagen que nos permite entender de manera más sencilla cómo es el comportamiento de las corrientes al interior de la microcámara de combustión es la que se muestra en la figura 47. Allí se observa que cuando la $V_{combustible} = 500 \mu m/s$, la corriente de combustible no alcanza a superar el primer deflector; de hecho, no alcanza a evacuar el ducto de ingreso a la cámara de combustión debido a la presencia de aire en este lugar. Inclusive, es posible observar cómo algunas partículas de aire tampoco son capaces de acceder a la zona de deflectores y lo que harán es generar una cavidad de comburente al interior del microcombustor, pero sin combustible, lo cual redundaría en la inexistencia de combustión bajo esta configuración.

Por su parte la figura 47b muestra el comportamiento de ambas corrientes cuando $V_{combustible} = 750 \mu m/s$. En este caso ambas corrientes logran acceder a la zona de deflectores y superarla exitosamente, sin embargo se observa una mayor proporción de aire que de combustible. Este fenómeno puede ser interesante porque podría garantizar una combustión eficiente, donde todo el combustible pueda reaccionar y evitando los residuos intermedios de la combustión. Se observa adicionalmente que en el punto de alta velocidad las corrientes tienden a aproximarse mucho unas a otras y después del segundo deflector una de las líneas de corriente del combustible se encuentra justo entre varias de aire, indicando que se pasó de tener tan solo una interacción superficial de las capas límite de los fluidos a tener una mezcla física de ambos.

En el tercer caso, cuando $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$, se evidencia un comportamiento muy similar al del segundo caso, sin embargo la presencia de combustible en la sección de deflectores y aguas abajo es mayor. Adicionalmente, las dos corrientes que se encuentran mezcladas en la cámara de combustión podrían propiciar una combustión bastante eficiente. Aunque el combustible en el acceso a la cámara de combustión constituye un 50 % del aire, es evidente que esa proporción cambia al momento de superar los deflectores, por ende podría pensarse en encontrar las condiciones de mezcla con las cuales se supera la región de deflectores para determinar si habría combustión eficiente o no.

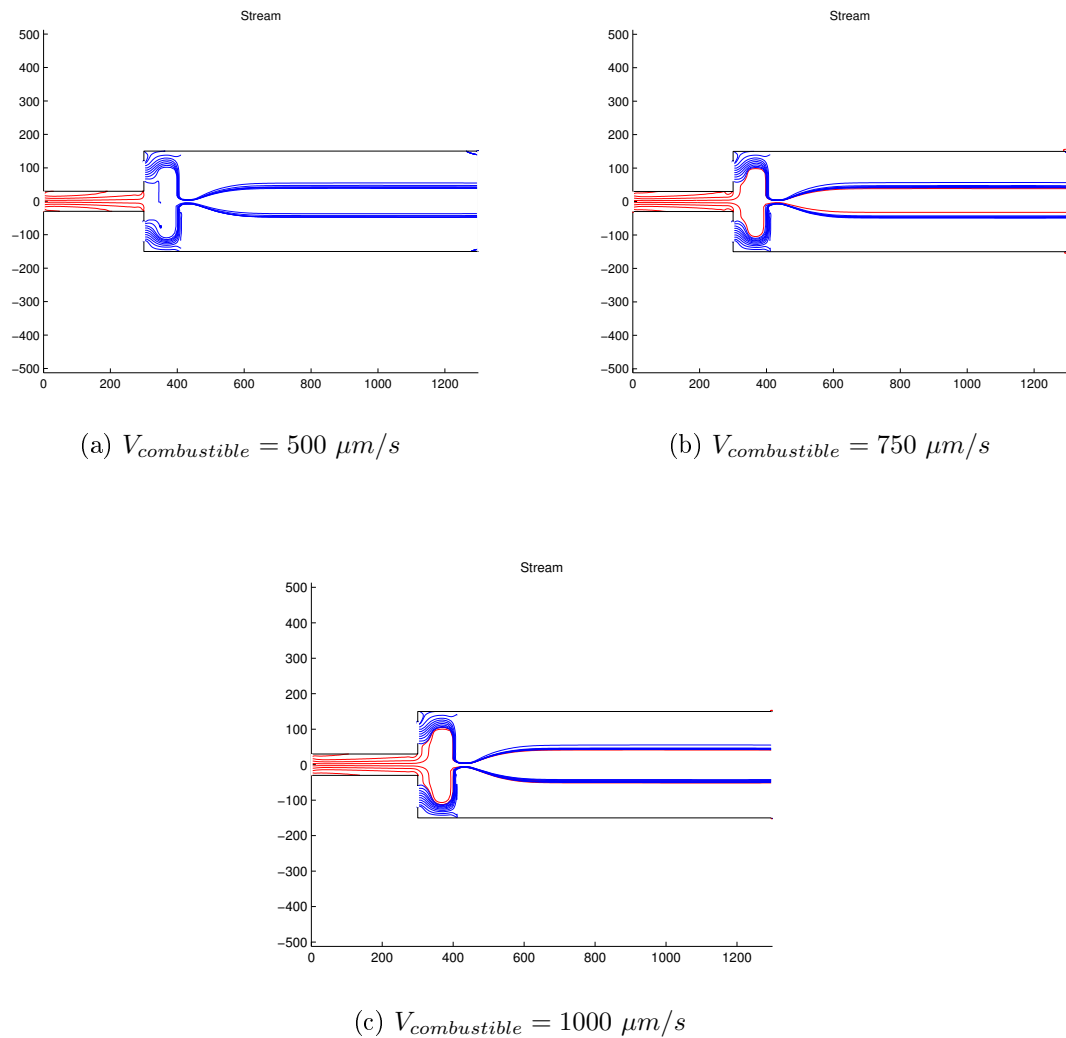


Figura 47: Seguimiento de partícula en microcombustor Tipo V

Por otro lado se presenta la comparación de los perfiles de velocidad obtenidos tanto por el método BEM como por medio del software comercial ANSYS Fluent en las figuras 48, 49 y 50. Si bien los contornos de velocidad generados por BEM y por ANSYS, mostrados en la figura 48, son similares, difieren básicamente en los valores máximos identificados en las zonas de alta velocidad y en los valores de velocidad en la sección entre el primer y el segundo deflector. El caso analizado por el método numérico indica una velocidad máxima cercana a los $6200 \mu m/s$, mientras que la velocidad en el mismo punto pero obtenida mediante el software comercial corresponde aproximadamente a $9900 \mu m/s$. Adicionalmente en la región entre los dos deflectores se observa velocidad

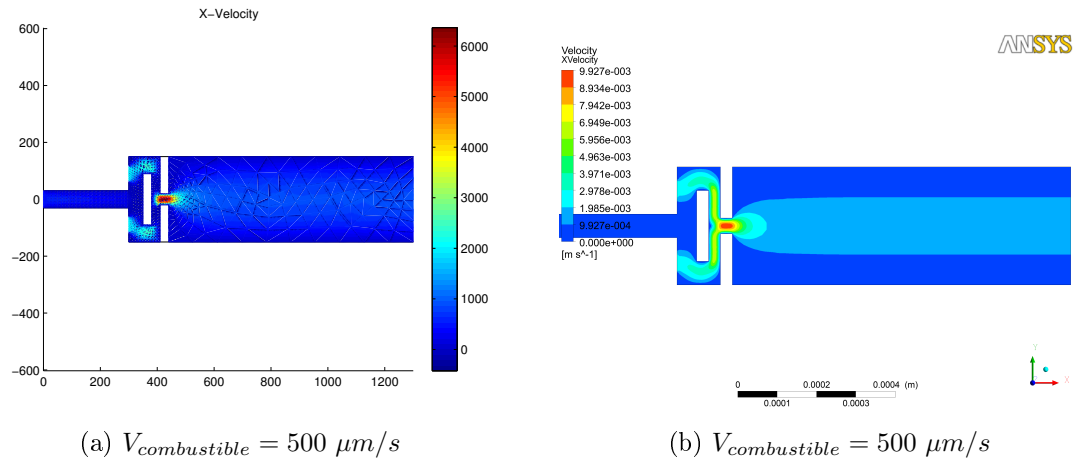


Figura 48: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo V para $V_{combustible} = 500 \mu m/s$ y $V_{aire} = 2000 \mu m/s$

en la componente X con valores cercanos a los $6000 \mu m/s$ para el caso modelado por ANSYS, mientras que en el caso del método numérico esa velocidad tiende a cero. Este problema puede deberse a diferencias en las mallas, debido a que la malla utilizada para modelar el problema por Elementos de Frontera no es muy refinada. Seguidamente, la figura 49 ilustra el caso en que $V_{combustible} = 750 \mu m/s$. Sucede absolutamente el mismo efecto que el descrito en el apartado anterior, con valores máximos cercanos a los $6500 \mu m/s$ para el caso de BEM y a los $10000 \mu m/s$. Por su parte, en el caso en que la $V_{combustible} = 1000 \mu m/s$, se obtienen velocidades igualmente grandes por ambos métodos. Alrededor de $7000 \mu m/s$ en el caso analizado por BEM, mientras que $10100 \mu m/s$ para el caso de ANSYS. Estos valores de velocidad son importantes puesto que aceleran demasiado los fluidos facilitando su interacción y la generación de un ambiente adecuado para la combustión, sin embargo hay que ser muy cuidadosos porque justo en estos puntos puede generarse una sobrepresión que puede afectar el correcto funcionamiento de los microcombustores y adicionalmente debido a las altas velocidades, el tiempo de permanencia al interior de la cámara de combustión podría verse reducido considerablemente, cediendo a la combustión incompleta o inexistencia de la reacción.

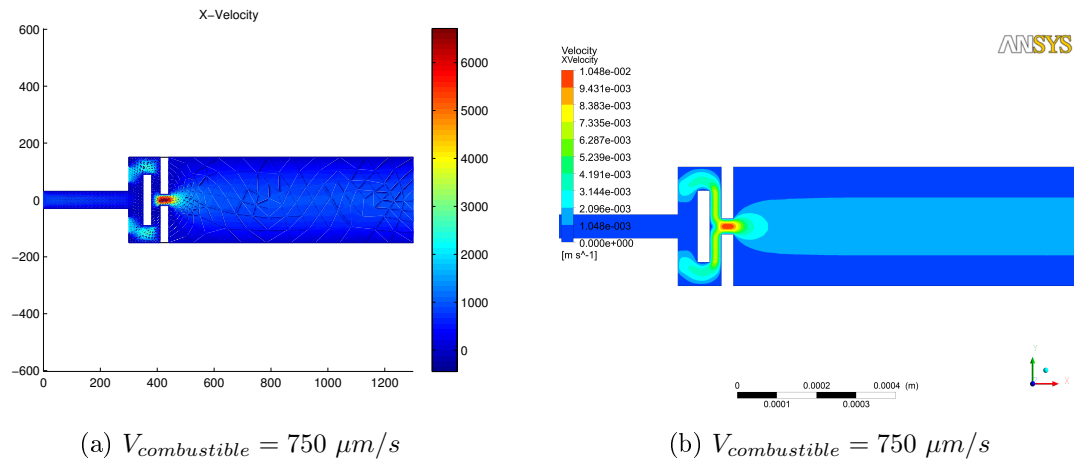


Figura 49: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo V para $V_{combustible} = 750\mu\text{m/s}$ y $V_{aire} = 2000\mu\text{m/s}$

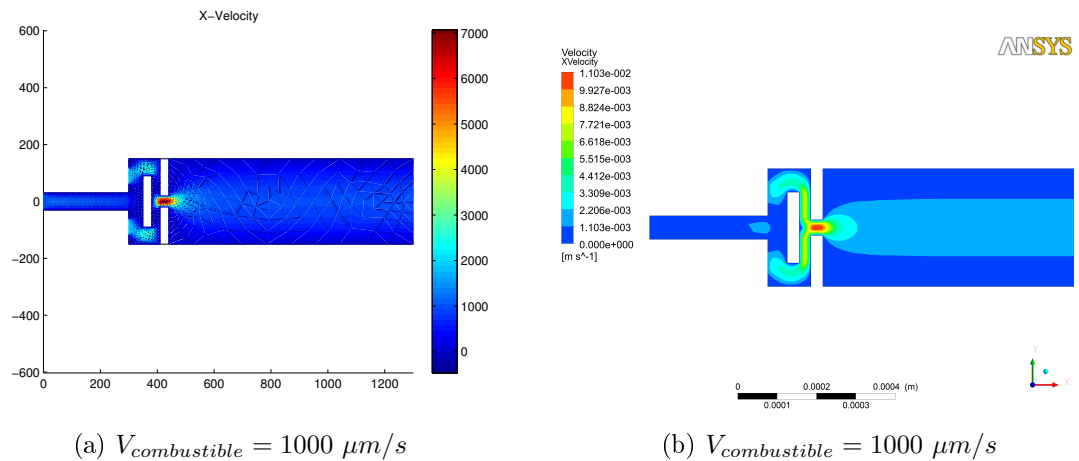


Figura 50: Contornos de velocidad en X en microcombustor Tipo V para $V_{combustible} = 1000\mu\text{m/s}$ y $V_{aire} = 2000\mu\text{m/s}$

6. Conclusiones

Los Elementos de Frontera son una buena opción a la hora de recurrir a una simulación de flujo de fluidos, debido a que a pesar de ser un método robusto de relativa fácil implementación, ofrece resultados muy aproximados a los valores reales en tiempos considerables y además facilita el trabajo de quien la realiza porque evita el manejo de mallas al interior del dominio.

La calidad de una simulación depende de muchos factores, pero esencialmente depende del conocimiento del fenómeno y los datos de entrada. Si no se le suministran los datos adecuados, los resultados de la simulación no serán significativos. Dentro de este proceso cobran mucha importancia varias etapas, pero una de las que más se evidencia en este trabajo es la etapa de mallado. Dado que para la solución por BEM no se pudo realizar un buen refinamiento de malla, muchos de los resultados no presentan congruencia numérica con los valores reportados por ANSYS, de ahí que un buen mallado sea también clave para la obtención de una buena simulación.

El uso de deflectores al interior de las microcámaras de combustión potencializa las posibilidades de que se genere combustión al interior de las mismas, debido a que generan condiciones de presión y velocidad que posibilitan la interacción entre las corrientes y sirven de puntos estratégicos donde se podrían ubicar generaciones de temperatura para activar las reacciones, sin embargo se debe ser cuidadoso con la relación de velocidades de las corrientes porque algunas configuraciones pueden obstruir el paso de las mismas, impidiendo los ambientes ideales para la reacción de combustión.

Las regiones donde se presentan altas velocidades vienen asociadas a zonas de alta interacción entre las corrientes de aire y combustible. Por ende, ubicar generaciones de calor en estos puntos favorecería notablemente la reacción de combustión. Igualmente, las zonas donde se presentan recirculaciones de fluidos, especialmente a la altura de los deflectores o aguas abajo de ellos, son también puntos estratégicos donde las condiciones pueden ser ideales para la combustión.

Debido a que en algunos casos es difícil obtener la mezcla de las dos corrientes al interior del microcombustor dados los regímenes de flujo que allí se manejan, la consideración de una premezcla de aire y combustible puede ser una solución que garantice

condiciones suficientes para que la combustión se pueda generar, aunque se incurriría en mayores tamaños de los sistemas y mayores controles de seguridad para evitar accidentes debido a lo delicado de manejar una premezcla.

Considerando las diferentes configuraciones geométricas estudiadas bajo las mismas condiciones de entrada de los fluidos a la microcámara de combustión, es posible determinar que la configuración denominada «*Microcombustor con deflector tipo II*» se presenta como la más adecuada desde el punto de vista fluidodinámico, puesto que la disposición estratégica de los deflectores hace que el fluido gane velocidad en algunos puntos, de manera moderada, incrementando las interacciones en los límites de ambas fases, pero de igual manera haciendo que el ascenso en la velocidad no sea tan elevado comparado con otras configuraciones, lo cual posibilita que el tiempo de residencia y de reacción de los fluidos al interior del reactor sea mayor que en los casos en los que la velocidad asciende drásticamente. Adicionalmente, se observa cómo en el seguimiento de partícula, el comportamiento de la corriente de aire y combustible es adecuado, comparado con las demás configuraciones, permitiendo el paso de ambas corrientes al interior de la cámara de combustión, sin generar excesos significativos de una o de otra, lo cual podría derivar en una mala combustión.

7. Trabajos futuros

El desarrollo de este trabajo implicó la aplicación del método numérico «Elementos de Frontera» a la solución de un problema de ingeniería real, en este caso, al análisis fluidodinámico de un microcombustor. El siguiente paso para tener un conocimiento inicial del fenómeno que sucede al interior de estas microcámaras es realizar un análisis térmico de los microcombustores, utilizando el mismo método numérico. Este análisis térmico tomaría como datos de entrada las mallas realizadas, el solucionador y los resultados de velocidad para ejecutar la solución térmica y encontrar perfiles de temperatura (considerando convección) en caso de una posible combustión al interior, para determinar la eficiencia de estos equipos como intercambiadores de calor o cámara para la producción de gases a presión.

Referencias

- [1] A. C. Fernandez-Pello, “Micropower generation using combustion: Issues and approaches”, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 29, no. 1, pp. 883–899, Jan. 2002.
- [2] L. C. Chia and B. Feng, “The development of a micropower (micro-thermophotovoltaic) device”, *Journal of Power Sources*, vol. 165, no. 1, pp. 455–480, Feb. 2007.
- [3] D. C. Walther and J. Ahn, “Advances and challenges in the development of power-generation systems at small scales”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 37, no. 5, pp. 583–610, Sep. 2011.
- [4] Y. Ju and K. Maruta, “Microscale combustion: Technology development and fundamental research”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 37, no. 6, pp. 669–715, Dec. 2011.
- [5] W. M. Yang and S. K. Chou, “Combustion in micro-cylindrical combustors with and without a backward facing step”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, pp. 1777–1787, 2002.
- [6] J. Hua, M. Wu, and K. Kumar, “Numerical simulation of the combustion of hydrogen–air mixture in micro-scaled chambers. Part I: Fundamental study”, *Chemical Engineering Science*, vol. 60, no. 13, pp. 3497–3506, Jul. 2005.
- [7] A. Mehra, “Development of a high power density combustion system for a silicon micro gas turbine engine”, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [8] J. Hua, M. Wu, and K. Kumar, “Numerical simulation of the combustion of hydrogen–air mixture in micro-scaled chambers Part II: CFD analysis for a micro-combustor”, *Chemical Engineering Science*, vol. 60, no. 13, pp. 3507–3515, Jul. 2005.
- [9] D. C. Kyritsis, S. Roychoudhury, C. S. McEnally, L. D. Pfefferle, and A. Gomez, “Mesoscale combustion: a first step towards liquid fueled batteries”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 28, no. 7, pp. 763–770, Sep. 2004.

- [10] T. Sakurai, S. Yuasa, T. Honda, and S. Shimotori, “Heat loss reduction and hydrocarbon combustion in ultra-micro combustors for ultra-micro gas turbines”, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 32, no. 2, pp. 3067–3073, 2009.
- [11] S. Y. Jejurkar and D. P. Mishra, “Thermal performance characteristics of a microcombustor for heating and propulsion”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 521–527, Mar. 2011.
- [12] P. L. Woodfield and K. Nakabe. . . , “Numerical study for enhancement of laminar flow mixing using multiple confined jets in a micro-can combustor”, *Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, no. 14, pp. 2655–2663, Jul. 2002.
- [13] B. Moghtaderi, “Effect of enhanced mixing on partial oxidation of methane in a novel micro-reactor”, *Fuel*, vol. 86, no. 4, pp. 469–476, Mar. 2007.
- [14] B. Moghtaderi, I. Shames, and L. Djenidi, “Microfluidic characteristics of a multi-holed baffle plate micro-reactor”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 27, no. 6, pp. 1069–1077, Dec. 2006.
- [15] Y. Yahagi, M. Sekiguti, and K. Suzuki, “Flow structure and flame stability in a micro can combustor with a baffle plate”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, no. 4, pp. 788–794, Mar. 2007.
- [16] H. S. Choi, T. S. Park, and K. Suzuki, “Turbulent mixing of a passive scalar in confined multiple jet flows of a micro combustor”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 17–18, pp. 4276–4286, Aug. 2008.
- [17] L. L. Raja, R. J. Kee, O. Deutschmann, J. Warnatz, and L. D. Schmidt, “A critical evaluation of Navier–Stokes, boundary-layer, and plug-flow models of the flow and chemistry in a catalytic-combustion monolith”, *Catalysis Today*, vol. 59, no. 1–2, pp. 47–60, Jun. 2000.
- [18] P. Pre, R. M. Hemati, and B. Marchands, “Study on natural gas combustion in fluidized beds : modelling and experimental validation”, *Chemical Engineering Science*, vol. 53, no. 16, pp. 2871-2883, 1998.
- [19] J. M. Simmie, “Detailed chemical kinetic models for the combustion of hydrocarbon fuels”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 29, no. 6, pp. 599–634, Jan. 2003.

- [20] D. Zhang and S. I. Frankel, “A numerical study of natural gas combustion in a lean burn engine”, *Fuel*, vol. 77, no. 12, pp. 1339–1347, 1998.
- [21] C. a. Brebbia, J. Dominguez, and J. L. Tassoulas, *Boundary Elements: An Introductory Course*, vol. 58, no. 3. 1991, p. 860.
- [22] D. Nardini and C. A. Brebbia, “A new approach to free vibration analysis using boundary elements”, *Applied Mathematics Modelling*, vol. 7, pp. 157–162, 1983.
- [23] C. S. Chen, C. A. Brebbia, H. Power, and L. Vegas, “Dual reciprocity method using compactly supported radial basis functions”, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 150, pp. 137–150, 1999.
- [24] M. Giraldo, *Boundary integral method for two phase systems with non newtonian dispersed phase*, Universidad Pontificia Bolivariana, 2007.
- [25] C. Montoya, *Movilidad de un cuerpo sólido sumergido en flujo stokes con campo de velocidad en el infinito*, Universidad Pontificia Bolivariana, 2006.