



# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN  
EN ENERGÍAS RENOVABLES

## TESIS

### “ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DE UNA MEZCLA DE BIOGÁS-HIDRÓGENO”

PARA OBTENER EL GRADO DE: INGENIERO EN  
ENERGÍAS RENOVABLES

PRESENTA:  
URIEL EDUARDO LÓPEZ HERNÁNDEZ

DIRECTORES:  
M.C. JOSÉ YOVANY GALINDO DÍAZ  
M.C. YANHSY HERNÁNDEZ PORTILLO

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

OCTUBRE 2019



Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas  
Dirección de Servicios Escolares  
Departamento de Certificación Escolar  
Autorización de impresión



TUXTLA GUTIÉRREZ CHIAPAS  
08 DE NOVIEMBRE DE 2019

C. URIEL EDUARDO LÓPEZ HERNÁNDEZ

Pasante del Programa Educativo de: INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DE UNA MEZCLA DE BIOGÁS-HIDRÓGENO

En la modalidad de: TESIS PROFESIONAL

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional

Atentamente

Revisores

Firmas

DR. JOEL MOREIRA ACOSTA

DR. NEÍN FARRERA VÁZQUEZ

M. C. YANHSY HERNÁNDEZ PORTILLO

---

# Agradecimientos

Gracias primeramente a Dios por haberme dado el tiempo adecuado para realizar cada actividad del proyecto; el apoyo moral de mis padres en cada momento. Gracias al Instituto de investigación e Innovación en Energías Renovables por haber compartido las herramientas de trabajo. Al grupo de bioenergía por la suma de apoyo de conseguir el objetivo del estudio; además, un cordial agradecimiento a mis directores por la instrucción, asistencia y paciencia en todo el trayecto de trabajo, así también, agradecimientos al M.C. Luis Alberto Borraz Jonapa por sus contribuciones a este trabajo en temas relacionados a la combustión. Un agradecimiento al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Chiapas (COCYTECH) por el apoyo económico otorgado. Los autores agradecen al laboratorio nacional de supercomputo del sureste de México perteneciente a la red de laboratorios nacionales CONACYT, por los recursos computacionales, el apoyo y la asistencia técnica.

---

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>I</b>
<b>1. Generalidades</b>	<b>2</b>
1.1. Introducción . . . . .	2
1.2. Antecedentes . . . . .	3
1.2.1. Biocombustibles . . . . .	3
1.2.1.1. Biocombustibles sólidos . . . . .	3
1.2.1.2. Biocombustibles líquidos . . . . .	4
1.2.1.3. Biocombustibles gaseosos . . . . .	5
1.2.2. Hidrógeno . . . . .	6
1.2.3. Combustión de biogás e hidrógeno . . . . .	7
1.2.4. Mezcla de hidrógeno con otros gases como combustible . . . . .	8
1.2.4.1. Mezcla de hidrógeno-gas licuado de petróleo . . . . .	8
1.2.4.2. Mezcla de hidrógeno-metano . . . . .	9
1.2.4.3. Mezcla Biogás-Hidrógeno . . . . .	10
1.2.5. Estudios con la dinámica de fluidos computacional (CFD) . . . . .	13
1.2.5.1. Simulación de Combustión Hidrógeno-Biogás . . . . .	16
1.3. Declaración del problema . . . . .	17
1.4. Objetivos . . . . .	17
1.4.1. Objetivo general . . . . .	17
1.4.2. Obejtivos particulares . . . . .	17
1.5. Justificación . . . . .	18
1.6. Conclusión . . . . .	19

<b>2. Marco Teórico</b>	<b>20</b>
2.1. Generación de biogás . . . . .	20
2.1.1. Biocombustibles . . . . .	20
2.1.2. Biogás . . . . .	21
2.1.3. Biodigestión y equipo de generación . . . . .	22
2.2. Norma oficial mexicana NOM-025-ENER-2013 determinación de eficiencia térmica de estufas . . . . .	23
2.2.1. Combustión . . . . .	24
2.2.1.1. Poder calorífico . . . . .	25
2.2.2. Propiedades del hidrógeno y sistema común de generación . . . . .	26
2.3. Dinámica de fluidos computacional (CFD) . . . . .	28
2.3.0.1. Ecuación general de transporte . . . . .	29
2.3.0.2. Ecuaciones de transporte . . . . .	30
2.3.0.3. Promediado de Favre . . . . .	31
2.3.1. Discretización: método de volumen finito . . . . .	31
2.3.2. Mallado computacional . . . . .	33
2.3.2.1. Estructuradas . . . . .	33
2.3.2.2. No estructuradas . . . . .	34
2.3.3. Mecanismos de tratamiento de la turbulencia . . . . .	34
2.3.3.1. Simulación DNS (Direct Numerical Simulation) . . . . .	35
2.3.3.2. Simulación RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) . . . . .	35
2.3.3.3. Simulación LES (Large eddy simulation) . . . . .	36
<b>3. Metodología</b>	<b>37</b>
3.0.1. Dispositivos y sus conexiones . . . . .	37
3.0.1.1. Primera parte (Generación y almacenamiento del combustible) . . . . .	38
3.0.1.2. Segunda parte: Combustión . . . . .	40
3.1. Apartado numérico . . . . .	41
3.1.1. Pre-procesamiento . . . . .	41
3.1.1.1. Modelo físico del dominio . . . . .	42
3.1.1.2. Generación de bosquejo CAD del quemador . . . . .	42
3.1.1.3. Dominio del flujo y malla . . . . .	42

---

3.1.2.	Procesamiento . . . . .	44
3.1.2.1.	Condiciones de frontera . . . . .	44
3.1.3.	Post-procesamiento . . . . .	45
<b>4.</b>	<b>Resultados</b>	<b>46</b>
4.1.	Resultados del apartado experimental . . . . .	46
4.1.1.	Parte 1: resultados de la generación y compresión del biogás .	46
4.1.2.	Parte 2: resultados de la combustión . . . . .	49
4.2.	Resultados del apartado numérico . . . . .	52
4.2.1.	Resultados del pre-procesamiento . . . . .	52
4.2.1.1.	Resultados del modelo físico del dominio . . . . .	52
4.2.1.2.	Resultados del dominio de flujo . . . . .	53
4.2.2.	Resultados del procesamiento . . . . .	56
4.2.3.	Resultados del post-procesamiento . . . . .	59
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>62</b>
5.1.	Trabajos a futuro . . . . .	65
<b>6.</b>	<b>Anexos</b>	<b>66</b>
6.1.	Tipos biodigestores . . . . .	66
6.1.1.	Modelo Chino . . . . .	66
6.1.2.	Modelo Indio . . . . .	67
6.1.3.	Modelos horizontales . . . . .	68
6.1.4.	Modelos Batch por lotes . . . . .	69
6.2.	Archivo BlockMesh . . . . .	70
6.2.1.	Stove BlockMeshDict . . . . .	70
6.2.2.	Burner BlockMeshDict . . . . .	82
	<b>Bibliografía</b>	<b>118</b>

---

# Capítulo 1

## Generalidades

### 1.1. Introducción

La energía juega un papel muy importante en la vida moderna ya que a través de ella muchos de los servicios con los que contamos son posibles, ya sean a nivel doméstico o en la industria. Actualmente usamos combustibles fósiles, que también son una fuente de agentes contaminantes, además de que el uso de este tipo de combustible ha generado dependencia, marginación en la clases sociales, monopolios, entre otros problemas. Como solución se ha buscado la migración a fuentes de energía inagotable que tengan un mínimo impacto contaminante y una contribución positiva a la sociedad. Esta migración ha generado la necesidad de desarrollo tecnológico en diferentes áreas de la energía renovable. Dentro de las ramas más desarrolladas podemos encontrar: energía solar térmica, energía solar fotovoltaica, energía eólica, energía hidráulica, geotérmica y la bioenergía. La bioenergía es toda energía que se obtiene de recursos orgánicos que pueden clasificarse en fuentes sólidas, líquidas y gaseosas, dentro de las fuentes gaseosas se puede encontrar al biogás que es un combustible con mezcla de gases entre ellos metano. El metano es un gas que puede combustionarse y generar calor, que puede ser usado en diferentes aplicaciones cómo: la cocción de alimentos, calefacción, generación de energía eléctrica, etc. Los márgenes de porcentaje de metano que puede tener el biogás van del 40 al 60 % [1], lo que hace que el poder calorífico sea bajo, además de que la combustión pueda llevarse de manera incompleta. En el presente trabajo se propone a gregar un porce-

taje de hidrógeno como aditivo, uno de nuestros objetivos es tener una hornilla que permita la combustión de biogás e hidrógeno. La metodología a usar, toma en cuenta dos pilares fundamentales, el primero de ellos es la experimentación de una hornilla previa que usa biogás, el segundo se enfoca en la reproducción numérica de los resultados experimentales de la combustión de biogás y la adición de hidrógeno en la simulación numérica. En el capítulo de continuación se presentan los trabajos previos referentes al uso de hidrógeno como aditivo al biogás y el uso de herramientas numéricas para un mejor aprovechamiento mediante una combustión eficiente.

## 1.2. Antecedentes

### 1.2.1. Biocombustibles

Se define como biocombustibles a aquellos que son obtenidos de la biomasa, la cual es cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato del proceso biológico de organismos recientemente vivos. Los biocombustibles se caracterizan por un contenido de alcoholes, éteres, ésteres y otros productos químicos de origen orgánico de base celulósica, estos pueden sustituir completamente o parcialmente el uso de combustibles fósiles. Los biocombustibles son clasificados en tres, que son: sólidos, líquidos y gaseosos, cada uno de ellos son presentados a continuación.

#### 1.2.1.1. Biocombustibles sólidos

Los biocombustibles sólidos (BCS) son aquellos que provienen de la biomasa residual de actividades forestales o agroindustriales que se mantienen en estado sólido hasta su uso final, estos son: leña, paja, astillas, briquetas, carbón vegetal, etc; con un campo de aplicaciones de: generación de calor directo e indirecto, generación de vapor, cogeneración de electricidad y calor de proceso. Los BCS presentan un mayor potencial para desarrollo de la bioenergía y la mayor gama de aplicaciones (exceptuando al sector transporte). En la situación mundial la agencia internacional de energía (IEA siglas en inglés) concluye que el consumo de energía basado en fuentes fósiles es insostenible. La agencia estima que la bioenergía provee 50 EJ/año que es el 10 % del suministro energético global, los planes apuntan que para el 2050 se provean

160 EJ/año y que con ello se reduzcan las emisiones por 2 GtCO<sub>2</sub>/año. Las tendencias indican que estas serán obtenidas en forma sostenible a partir de los residuos, será económicamente competitiva contra los combustibles fósiles en circunstancias favorables para los próximos 15 años. Un estudio más reciente, menciona que las proyecciones son confirmadas por la agencia internacional de energía renovable [2].

### 1.2.1.2. Biocombustibles líquidos

Los biocombustibles líquidos proveniente de la materia orgánica tal como plantas herbáceas, oleaginosas y los subproductos de la industria alimenticia, pertenecen a la clasificación de segunda generación, son aquellos que para ser usados necesitan un procesamiento previo, la consistencia de estos son de tipo líquido y son principalmente usados en el área de transporte, estos son: alcoholes, aceites vegetales, biodiésel, etc. El desarrollo de biocombustibles líquidos indica que en la actualidad existen 362 plantas productoras de etanol, lo que corresponde a una capacidad total de producción de 189.32 m<sup>3</sup>/día de bioetanol hidratado y 100,653 m<sup>3</sup>/día de bioetanol anhidro. Es importante mencionar que el 97.1 % de la producción corresponde a bioetanol de primera generación a partir de jugo y melaza de caña de azúcar. Debido a las presiones internacionales para disminuir el uso de cultivos alimenticios para producir bioetanol y al aumento en el consumo de energéticos en el mundo, se espera que el etanol de segunda generación cobre mayor importancia en los próximos años. La Unión Europea en 2011 anunció el inicio de operaciones de la primera biorrefinería en Italia, para producir bioetanol completamente a partir de lignocelulosa. Se han anunciado proyectos similares en Brasil, Estados Unidos de América, República Checa, España, Finlandia y China. La importancia del bioetanol lignocelulósico se deriva de la posibilidad de utilizar materia prima más barata, evitar la competencia directa e indirecta con la alimentación humana y, al mismo tiempo, reducir los riesgos ambientales. En cuanto al biodiésel, su producción mundial en el 2001 fue de 959,000 m<sup>3</sup>, y de 15,760,000 m<sup>3</sup> en 2009, esperando a que se triplique hasta el 2020. En la década pasada, se concentró en países europeos, con un liderazgo por parte de Alemania, Estados Unidos de América, Brasil, Argentina, Canadá, Australia y el sur de Asia, han presentado mayor capacidad de producción. Desde el lanzamiento del Programa Nacional de Producción y uso de Biodiésel, en diciembre del 2004, hasta

finales del 2011, Brasil dejó de importar 7,900 millones de litros de diésel, lo que equivale a una ganancia de aproximadamente 5,200 mdd [2].

### 1.2.1.3. Biocombustibles gaseosos

Los biocombustibles gaseosos son obtenidos a partir de sistemas especializados que realizan la digestión anaeróbica de residuos orgánicos, en este área se encuentra en mayor desarrollo el biogás. Este biocombustible es una mezcla gaseosa producida por la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas. La composición típica del biogás en una alta proporción corresponde al metano ( $CH_4$ ), un gas combustible que permite la utilización de este producto con fines energéticos. En este sentido, el biogás puede ser de gran utilidad en el campo al tener un poder calorífico (16.63 MJ/Kg) que puede reemplazar con cierta ventaja a combustibles tradicionales que cumplen la misma función. Las áreas rurales se caracterizan por disponer de grandes cantidades de desechos provenientes de las actividades agrícolas que ahí se desarrollan [1]. El estiércol de los animales, las cáscaras de las frutas, las hojas, los residuos de la cocina y los demás materiales orgánicos similares pueden, teóricamente, ser convertidos en energía y en abono que retorna a la tierra de donde fue tomado por las plantas. El biogás se produce a través de un proceso de descomposición, pasando por las siguientes fases: hidrólisis por bacterias fermentativas, ácido-génesis y aceto-génesis, para finalmente formarse el metano en la etapa de metano-génesis. La producción de biogás obedecerá al tamaño y especie del animal tomando en cuenta la temperatura promedio anual y la eficiencia de reacción anaerobia del proceso. El biogás estimado que se obtiene, es de entre el estiércol producido por día de cada uno de los tamaños y especies [3]. En la categoría mundial, en Europa, la producción de energía a partir de biogás fue de 15.1 millones de toneladas equivalentes de petróleo en el año 2012. Las plantas aumentaron anualmente teniendo en funcionamiento 801 generadoras de biogás, los países más destacados de este continente son: Alemania, Italia y el Reino Unido. Por otro lado, en América, los Estados Unidos posee más de 2,200 plantas de producción de biogás y Brasil es líder de la región y tiene en operación alrededor de 24 plantas, que representan una producción energética de 84 MW. A lo que corresponde para México entre 2002 y 2005, que fue uno de los países líderes en el desarrollo de la digestión anaerobia en el mundo, la producción de biometano a

partir de residuos agrícolas, fue un potencial estimado de 5-7 millones de toneladas de equivalentes de dióxido de carbono ( $CO_2$ ). En el 2012, la producción nacional de biogás fue de aproximadamente 1.82 PJ, equivalente a 0.03 % del total de la energía generada en el país. En particular, en el grupo de las energías renovables, el biogás es la quinta fuente potencial de energía [2].

### 1.2.2. Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico con número atómico 1. Debido a sus distintas propiedades, no se puede definir claramente en ningún grupo de la tabla periódica, aunque muchas veces se sitúa en el grupo 1 (o familia 1A) por poseer un solo electrón en la capa de valencia o capa superior. Es el elemento químico más abundante, al constituir aproximadamente el 75 % de la materia visible del universo. En su secuencia principal, las estrellas están compuestas principalmente por este elemento en estado de plasma. El hidrógeno es relativamente raro en la Tierra y es producido industrialmente a partir de hidrocarburos como, por ejemplo, el metano. La mayor parte del hidrógeno se obtiene in situ, es decir, en el lugar y en el momento en que se necesita. Los mercados más grandes del mundo utilizan el hidrógeno en diferentes sectores, como en la producción de amoníaco. Este elemento puede obtenerse a partir del agua por un proceso de electrólisis, algunas propiedades que presenta son: una elevada densidad energética con base a su masa (120 MJ/kg), una baja densidad energética con base a su volumen (10.37 MJ/Nm<sup>3</sup>) y una densidad másica de 0.089 kg/m<sup>3</sup>. Es posible almacenarlo de forma sólida, líquida y gaseosa [4].

### 1.2.3. Combustión de biogás e hidrógeno

El biogás ha sido una alternativa para la adquisición de energía tal es el caso de Mandal que en 1999 se centralizó en la composición del biogás para el análisis de la generación de calor por medio de la combustión. La cantidad de combustible generado fue evaluado por el método de desplazamiento de agua durante 12 semanas. Durante las pruebas de combustión se utilizaron los siguientes equipos: un indicador de temperatura analógico, una sonda de termopar y un bulbo de control de agua ácida. El porcentaje de metano en cada una de las muestras anteriores lo determinaron usando un cromatógrafo de gases; para la combustión de biogás se utilizó como mechero una boquilla conectada al final de todo el sistema de conexiones. El autor reportó en sus resultados de su experimentación a partir del combustible generado del digestor de laboratorio, que la temperatura de la flama es dependiente de la cantidad de metano contenido dentro del biogás; según sus reportes indicaron que los datos pueden variar si el gas se genera para el experimento de una planta de biogás [5].

A su vez el autor Cacia realizó un análisis experimental donde hicieron pruebas de combustión centrando el trabajo en el uso del biogás. En el experimento de combustión utilizaron un sistema que regula las porciones de oxígeno con el fin de demostrar que al realizar las variaciones del comburente se tendrá cambios en la combustión. Durante el estudio realizado se llevó a cabo un análisis comparativo del uso de aire normal y la adición de oxígeno en el comburente. El enriquecimiento del aire con oxígeno de la mezcla aire-biogás mejora algunas de sus propiedades de transporte como la conductividad térmica, e incrementa la velocidad de las reacciones de oxidación durante la combustión, atenuando los efectos negativos de la presencia del  $CO_2$  en el biogás. La velocidad de deflagración laminar, al igual que la energía mínima de ignición, presentaron la mayor sensibilidad al enriquecimiento del aire con oxígeno en el proceso de combustión del biogás [6].

Adicionalmente al tema, el autor Lira realizó cálculos de eficiencia de quemado de biogás, los experimentos los realizó con pruebas de ebullición de agua en condiciones controladas. El autor buscó optimizar la relación de aire-gas, dentro de las implicaciones fue necesario hacer un incremento de 2 a 3 veces en la válvula dosificadora de

gas licuado de petróleo (GLP) además se realizaron modificaciones en la geometría del paso de aire desde el exterior. Los resultados arrojaron que la combustión del biogás fue más eficiente que la del GLP, obteniendo 69 % adicionando al comburente 8.7 a 9.4 % de oxígeno [7].

Además del biogás, el hidrógeno es una alternativa para la generación de calor. Tal es el caso de autor Jin quien hizo experimentación de la combustión de hidrógeno para procesos industriales. Esta investigación la realizó con mecanismos de reacción con el sistema de medición GR1 3.0. Para los análisis se construyó un microjet con quemadores distribuidos en 3x3 con dimensiones de 36.5 mm por 100 mm de longitud y diámetro de 1 mm, estos rodeados con entradas de aire de 3.87 mm, la cámara de combustión fue elaborada con cuarzo. La potencia de entrada (basado sobre el valor bajo de calor) de  $H_2$  se varió en un rango de 0.1 hasta alcanzar un total de 1 kW. La relación de equivalencia fueron cambiadas a 0.5, 0.65 y 0.95. El investigador reportó que los cálculos de la estructura de la flama y los valores de su distribución concordaron con los resultados experimentales. El autor demostró que la combustión de  $H_2$  puede ser usada como fuente térmica porque la velocidad de quemado es la ideal. Además, dió a conocer que en todos los cálculos, las condiciones de liberación de calor, la relación de equivalencia, la estructura y distribución de la llama lograron cambiar con la potencia de entrada. Así mismo, en las pruebas obtuvieron que el hemisferio de la llama fue uniforme con una alta tasa de liberación de calor esto es básicamente una ventaja para la combustión de  $H_2$  como fuente térmica en procesos industriales [8].

#### **1.2.4. Mezcla de hidrógeno con otros gases como combustible**

##### **1.2.4.1. Mezcla de hidrógeno-gas licuado de petróleo**

El hidrógeno ha sido utilizado como combustible desde el año 2012 , actualmente se ha iniciado a mezclar con otros combustibles convencionales, tal es el caso de la mezcla de GLP con  $H_2$ . Cheung reporta que los gases fueron suministrados de cilindros de alta presión con un control de flujo de masa en los combustibles y el aire

comprimido. La premezcla fue introducida dentro de una cámara cilíndrica. Antes del quemador, la cámara estaba completamente llena de esferas de acero inoxidable muy pequeñas para tener una mezcla homogénea y poder evitar el retroceso. La mezcla se compuso por GLP de grado comercial (70 % butano y 30 % propano por volumen) e hidrógeno (con pureza de 98 %)[9]. La experimentación para nuevas mejoras llevó a este autor a realizar pruebas que centra el efecto que toma el hidrógeno que al ser adherido en relaciones equivalentes al combustible GLP, genera mejoras a la estructura de la llama y la temperatura, mostrando una tendencia lineal. Para la mayoría de las pruebas realizadas y los principales resultados obtenidos indican que con el aumento de hidrógeno generó cambios de apariencia y características de transferencia de calor de la flama y disminución de las emisiones de contaminantes [9].

#### 1.2.4.2. Mezcla de hidrógeno-metano

Siguiendo con los estudios del uso de hidrógeno como combustible el autor Burbano presenta la experimentación de la adición de hidrógeno al gas metano, reporta el análisis de la estructura de la llama y las emisiones de la combustión en un sistema de quemado atmosférico. El estudio demostró que existe la velocidad de quemado laminar, esto es una variable muy significativa que afecta la altura del cono azul de la flama. La experimentación evidenció el desarrollo que presenta la flama laminar y la velocidad de quemado al aumentar la cantidad de hidrógeno. El método experimental que se realizó fue el diseño de un dispositivo el cual cuenta con el inyector de combustible de un diámetro de 1 mm, se tiene también el puerto de entrada a un diámetro de 17 mm, la presión que se uso para la inyección del combustible fue de 20 mbar y se realizó el análisis del gas con el equipo MAIHAK-MULTOR 620. Las pruebas realizadas demostraron que por cada porción de hidrógeno agregado las emisiones de monóxido de carbono (CO) tienden a decrecer, promoviendo a que el CO se oxide a  $CO_2$  y que los valores que corresponden a la velocidad laminar cambian de manera muy evidente, por lo cual hizo que la combustión del combustible haya tenido buena estabilidad [10].

### 1.2.4.3. Mezcla Biogás-Hidrógeno

Uno de los primeros trabajos relacionados con la combustión de la mezcla de hidrógeno-biogás fue reportado por Leung, algunas características del trabajo fueron: un contenedor de acero inoxidable con una sección transversal de 127 x 127 mm, ventanas de cuarzo que permitieron el estudio de la flama, una corriente de aire suministrada por una sopladora centrífuga y una placa plana con forma de panal para garantizar el flujo uniforme de aire. Los combustibles (metano e hidrógeno) y diluyente (dióxido de carbono) se suministraron desde cilindros de alta presión en forma separada. Se hizo una provisión para mezclar todos los gases homogéneamente antes de la entrada del combustor. Las mezclas de combustible se descargaron verticalmente en la cámara a través de un tubo largo de acero inoxidable de 6.4 mm de diámetro ubicado en el centro. Se instalaron diferentes boquillas de bronce, al final del tubo, de los cuales se usaron dos de ellas circulares, que tenía diámetros de 2.8 y 4.5 mm con espesores de labio uniformes de 1.1 y 0.25 mm, respectivamente. El combustible se enciende con una chispa eléctrica colocada inicialmente cerca el borde de la boquilla. Los resultados encontrados fueron que al adicionar hidrógeno a la mezcla del biogás logró aumentar los límites de estabilidad de la llama y el rango de velocidad de flujo continuo, haciendo que haya una mejor combustión y que el combustible pueda ser usado en aplicaciones prácticas para generación de calor [11].

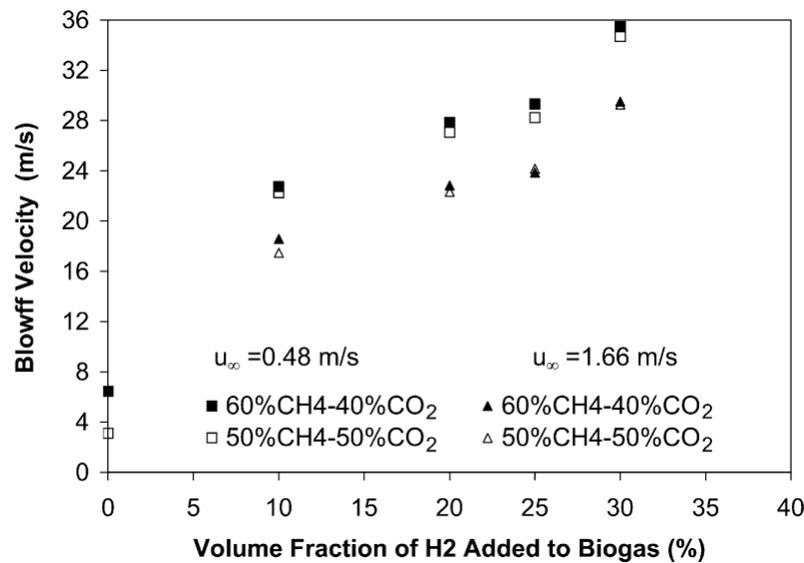


Figura 1.1: Límite de escape de mezcla de hidrógeno-biogás como una función de la fracción de volumen de hidrógeno presente en la mezcla [11].

Dentro de los resultados el autor presenta el comportamiento del límite de escape de biogás-hidrógeno a diferentes porcentajes de  $H_2$  (ver figura 1.1). Tomando en cuenta dos velocidades de corriente de mezcla,  $V=0.48$  y  $V= 1.66$  m/s, el límite de escape de biogás-hidrógeno presentó un crecimiento sustancial al incrementar de 0 a 10 % de  $H_2$ , de manera análoga se presentó otro incremento sustancial al incrementar de 25 a 30 % de  $H_2$ , lo cual sugiere un comportamiento no lineal. Por otro lado el incremento de límite de escape de hidrógeno-biogás representa una mejor combustión [11].

De igual modo el autor Zhen publicó los resultados experimentales de la combustión hidrógeno-biogás. Realizó el estudio de ignición con un mechero Bunsen que estaba acoplado a una sección tubular de 9 a 10 mm. La concentración de metano en la mezcla  $CH_4-CO_2$  fue variando desde 60 bajando a 50 y 40 % simbolizándolos como  $BG_{60}$ ,  $BG_{50}$  y  $BG_{40}$ , teniendo en cuenta que el subnúmero corresponde a la concentración de metano en la mezcla; incorporando a ellas las variaciones de hidrógeno en relación volumétrica de 10 a 50 %. Los resultados de este trabajo fueron: cambios de la estabilidad de la flama con mejoramiento de la combustión, el número de Rey-

nolds varió de 400 a 800 y la relación de combustible-aire de 0.8 a 1.2 mejorando la velocidad laminar de salida, al igual la temperatura fue incrementada a  $1685\text{ }^{\circ}\text{C}$  por la proporción de equivalencia de la mezcla a 1.2 y con Reynolds a 800, siendo en la experimentación la mejor. Además, en el experimento observaron la evidente reducción de emisiones de CO por cada fracción de hidrógeno adherido [12].

Así mismo, en esta línea de estudio el autor Zhen y Leugh trabajaron en colaboración en la experimentación donde se contempla la combustión de gases precursores: hidrógeno ( $H_2$ ), metano ( $CH_4$ ), nitrógeno ( $N_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). El sistema contenía una cámara de mezclado, múltiples válvulas para el control de flujo, manómetros, un termómetro y un sistema de analizador de flama (CCD Camera) conectados a una computadora. El quemador consistió en una salida circular de 1.6 mm con grosor de 4.5 mm. La fracción de metano por volumen en la mezcla  $CH_4-CO_2$  fue variada desde 60 a 50 % las cuales fueron agrupadas por separado para que posteriormente se le introdujera  $H_2$  puro a una relación volumétrica de 5 a 10 %. Cada mezcla fue etiquetada por:  $BG_{50}$ ,  $BG_{50-5\%H_2}$ ,  $BG_{50-10\%H_2}$ ,  $BG_{60}$ ,  $BG_{60-5\%H_2}$ ,  $BG_{60-10\%H_2}$ . La comparación propuesta, indica que, el gas inerte  $N_2$  se usó como reemplazo del  $CO_2$  en el biogás, para así analizar los efectos de la química del proceso de combustión. Los estudios demostraron que al quemar las mezclas de  $CH_4-N_2$  (en las porciones indicadas anteriormente) presentaron una buena estabilidad de la flama pero cuenta con la emisión de hollín al ser quemado con una coloración de la flama de tonalidad amarillenta. En la segunda mezcla del experimento  $CH_4-CO_2$  se encontró que no existe una buena estabilidad en la llama, se comprobó que el  $CO_2$  es uno de los componentes que le afectan; las emisiones que presenta dicha mezcla muestran que existe una baja liberación de hollín con una tonalidad de color totalmente azulada en la corteza de la llama. Los autores reportaron que en la experimentación de  $CH_4-N_2-H_2$  y  $CH_4-CO_2-H_2$  se obtuvo un aumento de la velocidad de flujo y la transferencia de calor conforme al incremento de la cantidad de  $H_2$  presente en las mezclas. Por otro lado la transferencia de calor total se vió afectada debido a que el hidrógeno tiene menor contenido de energía por unidad de volumen [13].

### 1.2.5. Estudios con la dinámica de fluidos computacional (CFD)

La combustión es un fenómeno físico ampliamente utilizado en procesos vinculados con las necesidades humanas desde la antigüedad hasta la actualidad, a pesar de ello, aprovechar en mayor medida la energía que la combustión puede darnos es todo un reto, ya que dicho proceso se relaciona con otros fenómenos físicos como la convección, la radiación, conducción, difusión y reacciones químicas. Actualmente se han desarrollado técnicas que permiten unificar los diferentes fenómenos involucrados en la combustión, una de las técnicas que han tomado mucha importancia en el desarrollo tecnológico y en la industria es la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés). La técnica se basa en la resolución de las ecuaciones de Navier -Stokes, que son las de conservación de momento y masa; la resolución directa en el tiempo de estas ecuaciones para regímenes considerados turbulentos no es posible, para ello se recurre a las ecuaciones de Reynolds que promedian en el tiempo permitiendo posteriores simplificaciones. La conservación de la energía constituye el primer principio de la termodinámica afirma que la cantidad total de energía en cualquier sistema físico aislado permanece invariable en el tiempo cambiando solo a otro tipo de energía.

Uno de los trabajos realizados usando las técnicas de CFD para analizar la combustión es el de Sorentino en el 2017 quien realizó una comparativa entre los parámetros experimentales y parámetros numéricos. El arreglo experimental consistió en pruebas con un reactor de flujo cíclico, conducidas en un laboratorio a escala; la configuración del quemador usado fue una cámara prismática cuadrada (de 0.2x0.2x0.5 m) para el proceso de combustión de flama baja. Además presentó un sistema de alimentación asimétrico de un par de chorros de combustible-oxidante que realizó un campo de flujos centrípeto. El principal flujo precalentado (compuesto por  $O_2$  y  $N_2$ ) fue alimentado en paralelo dentro de ella al chorro de propano (a temperatura ambiente); la distancia desde la pared lateral al inyector de oxidante fue de 0.02 m y la del combustible de 0.045 m; la salida estaba localizado en la parte superior de la cámara. El principal gas oxidante usado se condujo a través de un intercambiador de calor localizado dentro del calentador (de fibra de cerámica) para alcanzar el valor de temperatura deseado. El quemador cíclico fue equipado con termopares (tipo N),

se tenía un acceso óptico (ventana de cuarzo). Los dos termopares eran móviles (podían moverse a través del reactor) colocados en la parte media del reactor, uno de ellos posicionado cerca de la pared (a 0.02 m) y el siguiente colocado en la línea central de la cámara (a 0.1 m); los gases de escape fueron monitoreados por medio de una sonda refrigerada por agua; la mayor cantidad de emisiones de gases fueron analizadas por GC Analyser, bajo 5 minutos de operación en las condiciones estudiadas y para los gases óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ;  $NO_x$ ) por medio del analizador ABB. La configuración de dos chorros en contraflujo (CF) uno sobre el otro donde la llama se desarrollaba en el plano de estancamiento, el término de oposición se lleva a cabo por medio del trayecto de forma cíclica, los gases lanzados fueron mezclados por difusión molecular, esto hizo que la reacción se llevara a tiempo. Siguiendo con el trabajo, se usó simulación MGF (flamelet generated manifold) que sirvió para seleccionar un tipo de llama apropiada y generar una tabla de datos. Por otro lado el autor en la sección numérica construyó una geometría compuesta por 411,064 elementos hexaédricos dicha geometría representa el dominio de flujo donde se condicionaron algunas fronteras como entrada de combustible y oxidante. Para todo ello se resolvieron con Ansys Fluent las ecuaciones gobernantes que involucran la combustión aplicando las RANS en un modelo de turbulencia RNG k- $\epsilon$  con remolino. Los resultados mostraron que el comportamiento del sistema se mantuvo al 94 % para todas las condiciones investigadas en comparación de los resultados de la experimentación del quemador ciclónico. Las experimentaciones mostraron datos de la evaluación de la eficiencia y el mecanismo cinético de los fluidos, así también se examinaron los parámetros de operación en las distribuciones de temperatura y especies de emisiones [14].

Así también el siguiente investigador Hamedi realizó un trabajo donde incluye el mecanismo de la simulación, en él contenía una geometría a la que se basó en un reactor monolítico; el reformado de biogás fue modelado como un reactor heterogeneo isotérmico. El cual consistía de 2 zonas conectadas a la interfase denominadas como zona de alto calor y zona monolítica. La temperatura del reactante incrementaba mientras pasaba a través de la zona de alto calor. Dentro de la zona monolítica, en la superficie reformada de reacciones ocurría con la presencia del catalizador Rodio.

La simulación fue realizada con solo un cuarto de la geometría total de los reactores, asumiendo planos simétricos horizontales y verticales definidos por las coordenadas cartesianas x-y. La pared del reactor fue considerada isotérmica; el reactor fue integrado en un intercambiador de calor para ganar energía desde la corriente principal de escape del motor. Los datos fueron tomados por la aplicación REGR y la geometría fue discretizada por 25,680 estructuras hexagonales, usando el método de barrido con el software en Ansys ICEM CFD; la densidad de la malla fue incrementada cerca de la entrada del catalizador donde estaban las altas temperaturas y especies. Para asegurar que los resultados, la estructura de la malla fueron realizadas de manera independiente, el número de elementos fue incrementada a 39,462 y una máxima diferencia de 0.3% en hidrógeno molar. El modelo CFD de biogás reformado fue validado por la comparación del estudio experimental. En la simulación se logró encontrar que el modelo de equilibrio sobreestimó la tasa de reacción y las derivaciones para el alto rendimiento del hidrógeno. El porcentaje de discrepancia entre los datos medidos correspondientes a la predicción del CFD fue de 7.3% para  $H_2$ , 3.5% para  $CH_2$ , 15.9% para CO y 3.4% para  $CO_2$ . Se demostró que el perfil de temperatura incrementó rápidamente cerca de la entrada del catalizador debido a la reacción de oxidación exotérmica. La reacción seca endotérmica y corriente del reformado causó una subsecuencia de continuación de decremento de la temperatura siendo mucho más bajo que la oxidación parcial. El perfil de temperatura predicha fue una aceptable aportación con los datos medidos, mientras que la máxima discrepancia de 10.6% ocurrió en el pico de temperatura [15].

Además en el estudio de la mecánica de fluidos computacional, el autor Myers llevó a cabo un trabajo en el que incluye el mecanismo de solución de FIREFOAM para hacer la simulación de la mezcla de gases y flujo de un sistema de rociadores. El modelo consiste en muchos esparcidores, cada uno de ellas contienen una localización, orientación específicos y el valor de presión adecuado, estos parámetros fueron establecidos a partir de la ficha de cada rociador. Además de ellos el estudio necesitó establecer las características de pulverización, las especificaciones de elevación y ángulos azimutales, cada ubicación angular se fijó el volumen de flujo de la pulverización inicial, radio de ruptura, tamaño medio, ancho de distribución y velocidad de la gota. Durante la simulación realizada se generó N partículas langragianas por segundo

divididas en partes iguales de cada paso numérico, estos llevaron un volumen fijo y la ubicación angular creada aleatoriamente seleccionada probabilísticamente en función del flujo de volumen específico local, el total transportado fue dado por la presión de trabajo y el factor-K. Siguiendo a esto a cada partícula se le asignó un radio de ruptura al azar dependiendo de la distribución media local y la desviación estándar de los radios, de igual manera el tamaño de gota por Log-normal/Rosin-Rammler. Por último realizaron la asignación de la magnitud de velocidades, dirigidas radialmente lejos del aspersor. Todas las características detalladas de rociado espacial fueron introducidas para el desarrollo de mapas de resolución de cada uno de los parámetros ya establecidos anteriormente. Los resultados que se obtuvieron, fueron que el modelo desplazó el límite empírico de la superficie de medición a la de ruptura lo cual este puede capturar la correlación de tamaño-velocidad de caída. Los cambios permitieron que la aceleración inicial de la fase gaseosa inducida por la inyección fuera capturada, tuvo lugar en una superficie continua en vez de nodos, lograron eliminar errores introducidos por la innecesaria discretización de la pulverización. Por último en lugar de la inyección uniforme fue cambiada por la distribución aleatoria en cada una de las partes, estas características dieron mucha fidelidad al modelo. Tuvo como resultado de que muy pocas partículas langragianas fuesen introducidas en áreas de flujo de gran volumen, lo que refleja el comportamiento real de los rociadores [16].

#### 1.2.5.1. Simulación de Combustión Hidrógeno-Biogás

Otro artículo relacionado a la combustión utilizando técnicas numéricas lo realizó Zohra quien incluye gases tales como:  $CH_4-H_2$ - AIRE, llevada a combustión sin premezclar. El trabajo tomó en cuenta una geometría similar a la de una farola con diámetro de 50 mm y una salida del combustible de 3.6 mm. Se introdujeron como parámetros de entrada: una velocidad de combustible de 118 m/s con una intensidad de turbulencia de 10% a una temperatura de 330 K, velocidad de aire de 40 m/s con intensidad de turbulencia de 10% a través de un diámetro hidráulico de 0.25 m a 300 K. La geometría utilizada generó una malla compuesta con primas hexaédricos con aproximadamente a 11,000 nodos, la malla 2D fue configurada con paredes adiabáticas y resueltos con Ansys CFX. Los datos y resultados obtenidos se correlacionaron tanto como sea posible a los datos experimentales para varias condiciones

que incluyeron : equivalencia estequiométrica y tasas de flujo másico. Se destaca en el estudio que las pruebas de combustión realizadas mejoran al introducir hidrógeno en la mezcla, las mezclas ricas en este elemento llegaron a mostrar que los picos de temperatura se elevan [17].

### 1.3. Declaración del problema

Los biocombustibles son una alternativa para solucionar los problemas relacionados con el uso de la energía fósil. Dentro de los biocombustibles se encuentra el biogás que como ya se ha hecho mención su poder calor calorífico es bajo con valor aproximado de 25 MJ/Kg debido a la presencia de gases no combustibles en la mezcla, este mismo hecho provoca que su combustión sea incompleta y la transferencia de calor sea obstruida. Recientemente se han hecho estudios de la mezcla de este gas con hidrógeno en mecheros de laboratorio, destacando un incremento en la eficiencia de la combustión y transferencia de calor del biogás, en complemento el biogás se utiliza de manera convencional en quemadores comerciales, que hasta el momento no se ha encontrado registro del estudio de la mezcla biogás-hidrógeno en este tipo de quemadores.

### 1.4. Objetivos

#### 1.4.1. Objetivo general

Evaluar numéricamente la eficiencia térmica de un quemador comercial con la mezcla de biogás-hidrógeno.

#### 1.4.2. Obejtivos particulares

- **Evaluar un quemador comercial para biogás mediante la norma oficial mexicana NOM-025-ENER-2013.**
  - Estudiar la norma oficial mexicana NOM-025-ENER-2013.
  - Ejecutar la norma oficial mexicana NOM-025-ENER-2013.

- Determinar la eficiencia térmica del quemador.
- **Reproducir numéricamente mediante técnicas de CFD la eficiencia térmica del quemador comercial utilizando biogás.**
  - Realizar el bosquejo CAD del quemador.
  - Generar la malla involucrada en la geometría del quemador usando Block-Mesh.
  - Definir las condiciones de frontera de la malla.
  - Reproducir numéricamente la eficiencia térmica del quemador usando OpenFoam.
- **Realizar estimaciones numéricas de la eficiencia térmica para diferentes concentraciones de biogás-hidrógeno.**
  - Definir los porcentajes de mezcla.
  - Preparar los casos a diferentes mezclas.
  - Determinar la eficiencia térmica para cada caso.

## 1.5. Justificación

El uso del biogás como combustible contribuye en la mitigación de patógenos y del metano al ambiente que naturalmente se produce por las excretas de diferentes animales en crianza, enfatizando que el metano tiene un efecto en la huella de carbono hasta 20 veces más que el dióxido de carbono. Este biocombustible puede ser implementado en la generación de calor disminuyendo el impacto socioeconómico de los combustibles convencionales. Además, en la literatura se reporta una mejora en la combustión de biogás al introducir pequeñas porciones de hidrógeno, pruebas realizadas a nivel laboratorio, dentro de los resultados obtenidos por los diferentes autores se identifica que a porcentajes mínimos de hidrógeno mezclados con el biogás se mejora la combustión, por otro lado no se han encontrado reportes del porcentaje óptimo de hidrógeno sobre quemadores comerciales, encontrar un porcentaje óptimo podría implicar innumerables pruebas de laboratorio que se verá reflejado

en un recurso económico elevado. Otra alternativa para obtener el porcentaje de hidrógeno óptimo es a través de la simulación por computadora de los fenómenos físicos involucrados en la combustión y en la transferencia de calor, evitando gastos por experimentación, siendo este el justificante con mayor representación en el desarrollo de este proyecto. La planeación del trabajo está bien establecida dado a que dentro del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables cuenta con toda la infraestructura y materiales para la realización del trabajo experimental; además cuenta con el equipo de supercómputo, el software que simula los fenómenos físicos. Hay que destacar que dentro del instituto también se cuenta con un grupo de investigadores conocedores de los diferentes temas, que están capacitados para ejecutar los equipos de trabajo de experimentación-simulación, que pueden llevar a cabo las actividades propuestas en este proyecto.

## **1.6. Conclusión**

El análisis tendrá como fundamento las fuentes bibliográficas, tomando cada parte importante para poder adaptarlas al proyecto. Los niveles de energía de cada uno de los gases presentan una buena alternativa, mediante la adaptación del quemador de biogás al sistema CFD se podrá conocer el comportamiento de combustión para ser adaptadas a sistemas de generación de calor (estufa de biogás-hidrógeno), la investigación podrá realizar mejoras dando opciones de desarrollo para el mejor aprovechamiento de la energía, que conllevará al avance en el futuro de nuevas adaptaciones.

---

# Capítulo 2

## Marco Teórico

En el presente capítulo se dan a conocer los fundamentos físicos y técnicos usados en el trabajo de investigación. En el primer subtema se fundamenta la generación del combustible metano a partir de la biodigestión, en un segundo subtema se explica la combustión y las formas de transferencia de calor, por último se comenta el modelo usado en la simulación numérica para reproducir los fenómenos involucrados.

### 2.1. Generación de biogás

#### 2.1.1. Biocombustibles

El término biomasa, en un sentido general, se enfoca a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos recientemente vivos, como plantas, o sus desechos metabólicos (el estiércol); el concepto de biomasa comprende productos de origen vegetal como de origen animal [18]. Tanto los combustibles fósiles como los biocombustibles, tienen origen biológico; toda sustancia susceptible de ser oxidada puede otorgar energía. Si esta sustancia procede de plantas, al ser quemada devuelve a la atmósfera dióxido de carbono que la planta tomó del aire anteriormente. Las plantas, mediante la fotosíntesis, fijan energía solar y dióxido de carbono en moléculas orgánicas. El petróleo es energía concentrada proveniente de fotosíntesis realizada hace millones de años concentrada, su cantidad es limitada. En el caso de los biocombustibles, la sustancia a ser quemada proviene de

fotosíntesis reciente, por eso se afirma que la utilización de biocombustibles no tiene impacto neto en la cantidad de dióxido de carbono que hay en la atmósfera. Los biocombustibles están clasificados en 3 diferentes secciones de las cuales se muestran en la tabla 4.2 algunos tipos:

Sólidos	Líquidos	Gaseosos
Paja	Alcoholes	Gasógeno
Leña sin procesar	Biohidrocarburos	Biogás
Astillas	Aceites vegetales	Hidrógeno
Briquetas y pellets	Ésteres derivados de aceites vegetales	–
Carbón vegetal	Aceites de pirólisis	–

Tabla 2.1: Tipos de biocombustibles [18].

### 2.1.2. Biogás

El biogás lo constituye una mezcla de gases y su composición depende del tipo de residuo orgánico utilizado para su producción. Algunos componentes de biogás tienen que ser eliminados de la mezcla para ser utilizado como combustible. El primero llamado ácido sulfhídrico es eliminado hasta en un 99 % haciendo pasar el biogás por un filtro con limaduras y birutas de hierro, el segundo  $CO_2$  puede ser eliminado haciendo pasar al gas a través de una solución acuosa con sosa cáustica [19]. En las tablas 2.3 y 2.2 se muestran los datos de composición del biogás:

Características	$CH_4$	$CO_2$	$H_2-H_2S$	Biogás 60/40	Otros
Porciones % volumen	55–70	27–44	1	100	3
Valor calórico MJ/ $m^3$	35.8	–	10.8	21.5	22
Valor calórico KCal/ $m^3$	8600	–	2581	5140	5258
Ignición % en aire	5–15	–	–	6–12	–
Temperatura de ignición °C	650–750	–	–	650–750	–
Densidad relativa	0.55	2.5	0.07	0.83	1.2
Flamabilidad Vol. en % aire	5–15	–	–	6–12	–

Tabla 2.2: Características del biogás [20].

Componentes	Fórmula química	Porcentaje (%)
Metano	$CH_4$	60-70
Gas carbónico	$CO_2$	30-40
Hidrógeno	$H_2$	1.0
Nitrógeno	$N_2$	0.1
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxígeno	$O_2$	0.1
Ácido sulfhídrico	$H_2S$	0.1

Tabla 2.3: Composición del biogás [20].

### 2.1.3. Biodigestión y equipo de generación

La biodigestión o digestión anaeróbica, consiste en un proceso biológico complejo, el cual es desarrollado por micro-organismos anaeróbicos, es decir, que trabajan en ausencia de oxígeno, transformando la materia orgánica (residuos domésticos, estiércoles, efluentes industriales, restos de cosechas, etc.) en biogás o gas biológico, se obtiene un efluente bio-fertilizante o bio-abono rico en nutrientes, está constituido por la fracción que no alcanza a fermentarse y por el material agotado. El biogás está compuesto principalmente por metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ), conteniendo otros gases en pequeñas concentraciones y vapor de agua. Este proceso se desarrolla de manera natural en el tracto intestinal de los animales, en los po-

zos negros “gas de pantanos”, y en los vertederos de residuos municipales [19]. En los biodigestores se reproduce este proceso de digestión de manera controlada y con objetivos específicos [21]. El biogás se produce a través de un proceso de descomposición anaeróbico del estiércol, pasando por las siguientes fases: hidrólisis por bacterias fermentativas, ácido-génesis y aceto-génesis, para finalmente formarse el metano en la etapa de metano-génesis. La producción de biogás obedecera al tamaño y especie del animal, tomando en cuenta la temperatura promedio anual. El biodigestor es la estructura física o reactor que favorece el proceso natural anaeróbico, la estabilización de la materia orgánica contenida en los residuos para la generación del biogás. El mecanismo de funcionamiento se ha desarrollado desde la antigüedad (ver anexo 6.1), que para la actualidad se han podido dar mejoras en el funcionamiento y mantenimiento [3].

## **2.2. Norma oficial mexicana NOM-025-ENER-2013 determinación de eficiencia térmica de estufas**

Los quemadores para la cocción de alimentos que usan gas LP o gas natural que se comercializan actualmente en el país son previamente probados de tal manera que el consumidor pueda ver la capacidad de rendimiento de funcionamiento, el análisis está basado en la norma oficial mexicana NOM-025-ENER-2013 la cual tiene como objetivo brindar protección al consumidor, lograr la preservación de recurso energético por medio de mejoras tecnológicas y de establecer la eficiencia térmica. La norma establece valores mínimos de eficiencia de los quemadores para verificar los requisitos de etiquetado, para adaptar los mecanismos de análisis se maneja la clasificación de los sistemas de cocción, la cual son: estufas, hornos y parrillas; de acuerdo a la fijación: de piso, de empotramiento y de superposición y dispositivos no disponibles: asadores, quemadores infrarrojos, quemadores para comal, quemadores ovales y aparatos que usen recipientes desechables (de acoplamiento directo). Los mecanismos de realización indican que en dependencia del tipo de quemador no deben presentar piloto de encendido permanente y si varían en el tipo de quemador

estos deben acoplarse a las especificaciones que la norma establece. Los equipos de medición de parámetros son los menos requeridos y pueden sustituirse por equipos equivalentes. Los quemadores deben cumplir la eficiencia térmica (ET) (ver ecuación 2.1) siguiente: los quemadores con capacidad térmica hasta 11,500 kJ/h, no deben ser menor que 45 % y los que tengan una capacidad mayor no deben ser menor que el 30 % que es la relación existente entre el calor absorbido por el agua y el calor liberado por el combustible [22].

$$ET = \frac{418.6(P + PU)\Delta T}{(PC \cdot \Delta Q \cdot FC)} \quad (2.1)$$

En donde  $ET$  es la eficiencia térmica en %,  $P$  es la masa del agua en kg,  $PU$  es la masa del utensilio de aluminio en kg por 0.22 (incluyendo la tapa),  $T_1$  es la temperatura del agua en °C,  $T_2$  es la temperatura en °C máxima del agua después de cerrar el suministro de gas,  $\Delta T$  es el gradiente de temperatura del agua en °C ( $T_2 - T_1$ ),  $PC$  es el poder calorífico del gas de prueba en  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ,  $Q_2$  es la lectura final del consumo de gas en  $\text{m}^3$ ,  $Q_1$  es la lectura inicial del consumo de gas en  $\text{m}^3$ ,  $\Delta Q$  es el consumo de gas en  $\text{m}^3$  ( $Q_2 - Q_1$ ).  $FC$  es el factor de corrección por temperatura y presión del lugar de prueba, que es calculada utilizando la ecuación 2.2:

$$FC = \frac{(P_{ag} - P_a) \cdot 288}{(T + 273) \cdot (101.3 - 1.705)} \quad (2.2)$$

En donde  $P_{ag}$  es la presión absoluta del gas en kPa,  $P_a$  es la presión de saturación del agua en kPa,  $T$  es la temperatura del lugar de la prueba en °C y 1.705 es la presión de saturación del agua a 15 °C, cuando se use un medidor de flujo húmedo.

### 2.2.1. Combustión

La combustión es un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor, que se producen entre dos elementos: el COMBUSTIBLE, que puede ser un sólido, un líquido o un gas y el COMBURENTE, el más conocido es el oxígeno o aire. Como proceso de oxidación rápida se diferencia de otras reacciones, por la presencia de llama. Para que la combustión tenga lugar han de coexistir tres factores:

- Combustible.

- Comburente.
- Energía de activación.

Estos tres factores se representan en el denominado triángulo de combustión (ver figura 2.1), en él, si falta alguno la combustión no puede realizarse. El comburente universal es el oxígeno, por lo que en la práctica se utiliza el aire, está compuesto, prácticamente, por 21 % oxígeno ( $O_2$ ) y 79 % nitrógeno ( $N_2$ ). Únicamente en casos especiales se utilizan oxígeno puro (por ejemplo en soldadura). La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión; puede darse el ejemplo de las estufas que se prenden por medio de una chispa eléctrica [23].

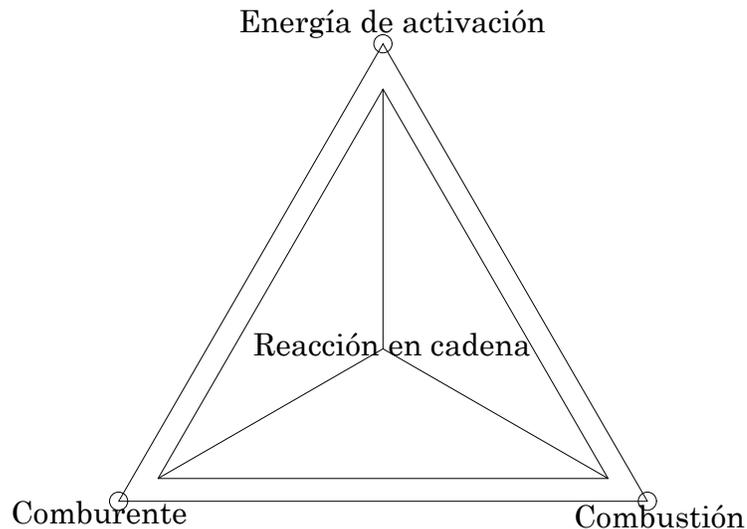


Figura 2.1: Triángulo de la combustión.

#### 2.2.1.1. Poder calorífico

El poder calorífico es definido como la cantidad de calor obtenido a partir de una oxidación completa, a presión atmosférica, por unidad de masa o volumen. Las unidades con la que es representado son las siguientes:

- Combustibles sólidos: kWh/kg.
- Combustibles líquidos: kWh/kg; kWh/l.
- Combustibles gaseosos: kWh/kg; kWh/ $Nm^3$ .

### 2.2.2. Propiedades del hidrógeno y sistema común de generación

El hidrógeno tiene un alto contenido de energía por unidad de masa con 141 MJ/kg y 119 MJ/kg en poder calorífico superior e inferior respectivamente. Estos valores son muy superiores a los otros combustibles convencionales, siendo el poder calorífico inferior tres veces mayor al de la gasolina [24]. La tabla (2.4) muestra las propiedades del hidrógeno:

Propiedades físicas	Unidad
Peso molecular	2.016
Temperatura de ebullición (1 atm)	-252.8 °C
Temperatura crítica	-239.9 °C
Presión crítica	12.98 atm
Densidad en gas	0.08342 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad en líquido	70.96 Kg/m <sup>3</sup>
Peso específico (aire= 1)	0.069
Masa atómica	1.00794
Poder calorífico	130.93 MJ/kg
Poder calorífico por volumen	10.79 MJ/m <sup>3</sup>

Tabla 2.4: Propiedades del hidrógeno [24, 25].

El hidrógeno diatómico no es explosivo pues requiere de una fuente de ignición para que esto ocurra. Para que el hidrógeno arda son necesarias tres condiciones: que se mezcle con un oxidante, que la mezcla esté dentro de los límites de inflamabilidad y que esté presente una fuente apropiada de ignición. Las mezclas de hidrógeno con aire, oxígeno, u otros oxidantes son altamente inflamables en un amplio rango de composiciones. Los límites de inflamabilidad, en porcentaje en volumen, definen el rango en el cual los combustibles gaseosos se incendian cuando están expuestos a una fuente de ignición con suficiente energía. Son dependientes de la energía de ignición, de la temperatura, de la presión, de la presencia de diluyentes, del tamaño y configuración del equipo, instalaciones o aparatos. El rango de inflamabilidad de las

mezclas hidrógeno-aire e hidrógeno-oxígeno se amplían si la propagación de la llama es hacia arriba y se estrechan si la propagación de la llama es hacia abajo. Las temperaturas de ignición son dependientes de la concentración y presión del hidrógeno gaseoso y del tratamiento superficial de los contenedores. Las temperaturas obtenidas son muy dependientes del sistema y de los valores seleccionados solo se deben aplicar a sistemas similares. A una presión de 101.3 kPa el rango de temperaturas de autoignición para el hidrógeno estequiométrico en aire está entre 773 a 850 K; en oxígeno estequiométrico está entre 773 a 833 K [26].

El hidrógeno se puede generar por diferentes procesos, siendo la electrólisis el único método renovable que es competitivo en la industria actual. Este proceso se realiza mediante dispositivos electroquímicos denominados electrolizadores, entre ellos se encuentra los alcalinos y los de membrana polimérica (PEM). Siendo el tipo PEM el más compacto (ver figura 2.2), además, puede trabajar con presiones de varios cientos de bares, manejan densidades de corriente elevadas y su diseño aumenta la vida útil de las membranas [27]. Estos electrolizadores pueden verse muy beneficiados por el desarrollo técnico que se está llevando a cabo sobre las pilas de combustible PEM y de su producción en masa. Actualmente ya se están vendiendo algunos modelos de electrolizadores PEM, a pesar de ser una tecnología relativamente muy nueva comparada con los electrolizadores alcalinos. Se espera que la eficiencia de los electrolizadores PEM pueda llegar hasta el 94%, pero por ahora esto es algo teórico. Los electrolizadores PEM funcionan bien para sistemas de energías renovables donde el suministro es muy variable. Generalmente los electrolizadores PEM son más adecuados para plantas pequeñas, especialmente aquellas que tienen una salida variable, mientras que los electrolizadores alcalinos son claramente mejores para grandes plantas que están conectadas a la red de energía [28].

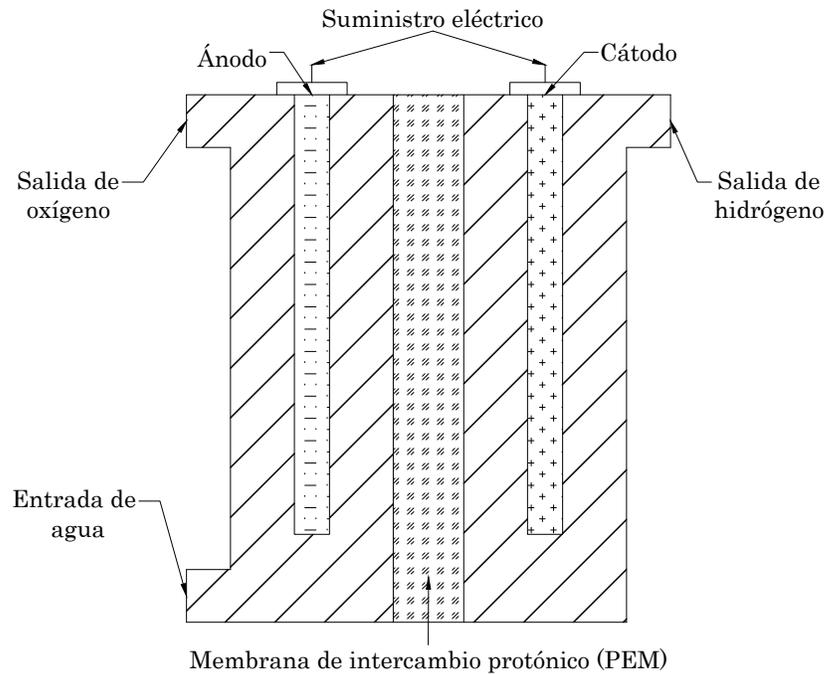


Figura 2.2: Electrolizador tipo PEM.

### 2.3. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

Optimizar sistemas desde un punto de vista experimental está condicionado en muchos casos a un número muy grande de experimentos que se traduce en tiempo de experimentación y costos elevados. Una técnica que recientemente ha tomado interés por la comunidad científica es la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés). Esta técnica pertenece al área de la mecánica de fluidos y se basa en la solución de un conjunto de ecuaciones que representan la conservación de masa, momento, energía y las especies, la técnica puede reproducir fenómenos físicos que incluyen la turbulencia, combustión y flujos multifásicos [29]. Sin embargo, solo se pueden resolver problemas idealizados debido a que en la mayoría de los casos las ecuaciones no tienen una solución analítica. Esta forma de solución presenta una ventaja sobre el experimento ya que puede resolver problemas complejos permitiendo tener resultados en un lapso corto. Los métodos teóricos generalmente se dividen

en dos partes: la primera solo cubre una solución analítica, lo cual no es factible usarlo al tener presentes funciones especiales o variedad de ecuaciones diferenciales o integrales. La segunda categoría se basa en los métodos numéricos que conllevan a los resultados dar una posible aproximación con el proceso de discretización, en ella abarca 3 tipos: las de diferencias finitas (MDF), de volumen finito (MVF) y de elemento finito (MEF), estas resuelven las ecuaciones de conservación de la masa, momentum, energía y especies químicas (transporte de masa) [30].

### 2.3.0.1. Ecuación general de transporte

Al considerar la variable específica  $\phi$  definida sobre un volumen de control y se calcula la variación temporal, teniendo en cuenta las variables del mecanismo fundamental de un flujo: la difusión (a nivel microscópico) y convección (a nivel macroscópico), ser posible llegar a la ecuación:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{Temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\vec{u}\phi)}_{\text{Convectivo}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi)}_{\text{Difusivo}} + \underbrace{S}_{\text{Fuente}} \quad (2.3)$$

Los términos que componen esta ecuación son:

- **Temporal**, muestra la variación local con el tiempo en el interior del volumen de control.
- **Convectivo**, representa el transporte de la variable de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad de flujo.
- **Difusivo**, corresponde a la mecánica de los fluidos a nivel molecular. La ley de Fourier para la difusión de calor, ley de Fick para la difusión de masa o la Ley de Newton para la difusión de cantidad de movimiento por viscosidad.
- **Fuente**, se toma en cuenta los puntos de generación o destrucción de la variable transportada.

Las ecuaciones de gobierno para el flujo, la transferencia de calor y de la masa, son enunciadas de forma conservativa como las ecuaciones siguientes, en cada una, los coeficientes de transporte tales como la variable  $\phi$  que es sustituida adoptando diferentes formas [31].

### 2.3.0.2. Ecuaciones de transporte

Cualquier flujo de fluido, es gobernado por 3 principios fundamentales: la conservación de la masa, del momento (2da ley de Newton) y de la energía, los cuales pueden ser expresados en ecuaciones matemáticas que en su forma más general suele ser en ecuaciones diferenciales parciales, las cuales son:

Continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.4)$$

Momento:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2.5)$$

donde  $\tau_{ij}$  es el tensor de estrés viscoso por:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (2.6)$$

y donde  $p$  es la presión,  $\mu$  es la viscosidad de la mezcla,  $\delta_{ij}$  es delta de Kronecker  $g_i$  es el vector de aceleración gravitacional

Energía:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial h}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu}{\sigma} \frac{\partial h}{\partial x_i} + \mu \left( \frac{1}{Sc} - \frac{1}{\sigma} \right) \sum_{\alpha=1}^N h_\alpha \frac{\partial Y_\alpha}{\partial x_i} \right) \quad (2.7)$$

donde  $h$  es la entalpía específica de la mezcla,  $Y_\alpha$  es la fracción de masa,  $Sc$  y  $\sigma$  son los números de Schmidt y Prandtl. Flujos lentos del número de Mach  $Ma \ll 1$  son considerados como consecuencia de los términos asociados con la energía cinética y la tasa de disipación viscosa son despreciados. Las leyes de Fourier y Fick de los fluidos moleculares son empleados.

Conservación de especies:

$$\rho \frac{\partial Y_\alpha}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial Y_\alpha}{\partial x_j} = -\frac{\partial J_{i,\alpha}}{\partial x_i} + \dot{\omega}_\alpha \rightarrow \alpha = 1, \dots, N \quad (2.8)$$

puede verse que  $\dot{\omega}_\alpha$  es la tasa neta de las especies  $\alpha$  por unidad de volumen,  $J_{i,\alpha}$  es la masa molecular del fluido [32].

### 2.3.0.3. Promediado de Favre

Al presentar muchos problemas en las ecuaciones de Navier-Stokes para la solución de flujos caóticos y turbulencia y que son imposible poderles resolver directamente, es necesario un modelo que otorgue escalas mucho menores. Para este caso el modelo de solución FireFoam implementa el procedimiento del desarrollo de Favre [33]. La promediación del tiempo clásico (Promediado de Reynolds) de una magnitud física  $\phi$ , esta hecha por:

$$\bar{\phi} \equiv \frac{1}{T} \int_T \phi(t) dt \quad (2.9)$$

Donde  $\bar{\phi}$  corresponde a la variable dependiente del tiempo  $\phi(t)$  sobre el intervalo  $T$ . La fluctuación  $\phi'$  es definida como:

$$\phi' = \phi - \bar{\phi} \quad (2.10)$$

El tiempo promediado de Favre para la densidad de misma magnitud  $\phi$  esta descrita por:

$$\bar{\phi} \equiv \frac{\bar{\rho\phi}}{\bar{\rho}} \quad (2.11)$$

Donde  $\bar{\phi}$  es la variable de filtración de Favre, que se define como:

$$\phi'' = \phi - \bar{\phi} \quad (2.12)$$

### 2.3.1. Discretización: método de volumen finito

El método de volúmenes finito o método de volumen de control, divide el dominio en un número finito de celdas no superpuestas sobre las que se impone la conservación de la variable  $\phi$  de manera discreta. La siguiente expresión plantea que:

$$\int_w^e \frac{d\phi}{dx} dx + \int_w^e \phi dx = 0 \quad (2.13)$$

Suponiendo una variación lineal entre los centroides de las celdas de los cuales la define  $\phi$ , toma el valor medio de la variación de  $\phi$  en cada celda como  $\bar{\phi}$ , estableciendo

que:

$$\frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x} - \frac{\phi_P - \phi - W}{\Delta x} + \bar{\phi} \Delta x = 0 \quad (2.14)$$

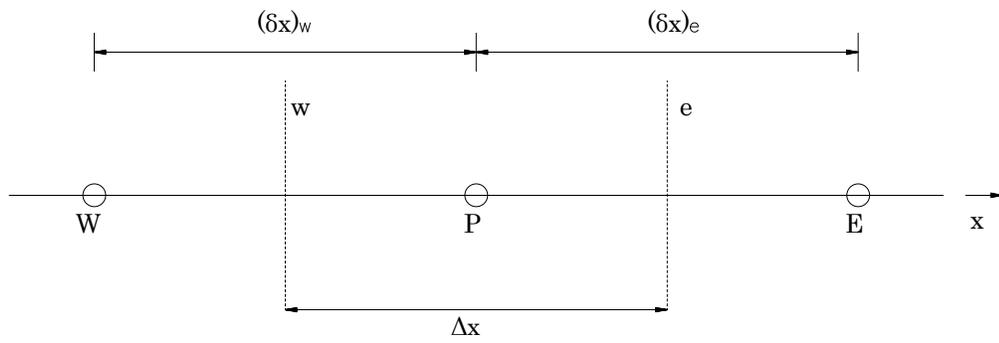


Figura 2.3: Discretización unidimensional por volúmenes finitos

donde la notación adoptada es  $P$  para el nodo actual y  $E$ ,  $W$  para los nodos a la derecha e izquierda respectivamente. Nótese que la aproximación anterior deja de ser exacta al haber supuesto que la variable  $\phi$  varía de forma lineal entre los nodos de la malla. Reordenando la ecuación, se llega a:

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + b \quad (2.15)$$

donde  $a_P$ ,  $a_E$  y  $a_W$  son los coeficientes de las variables en cada nodo implicado. Ecuaciones idénticas a la 2.15 se pueden obtener para cada una de las celdas de la discretización, resultando de nuevo un conjunto de ecuaciones algebraicas que se

deben resolver de manera acoplada. En este método se garantiza la conservación de la variable sobre la celda, es decir, que los flujos entrantes a la celda deben ser iguales a los flujos de salida. Esta propiedad, se cumple independiente al tamaño de la celda, sin embargo, que se preserve la conservación no significa que sea preciso [34].

### 2.3.2. Mallado computacional

La malla computacional consiste en la representación discretizada del modelo al cual se requiere estudiar. Se conforma por un conjunto de nodos y aristas, que se acoplan de manera conjunta a la geometría de estudio que se desea. Las superficies podrán ser triángulos, cuadriláteros o de las dos juntas. Una vez generada la malla se formarán los volúmenes que tendrán formas de tetraedros, hexaedros, y pirámides. Las propiedades físicas del fluido son calculadas en cada uno de los nodos generados correspondiente al volumen de control, el valor de la arista es interpolado para la unión de los dos nodos, se define que, dependiendo de la cantidad de elementos, la aproximación del resultado a la realidad, es importante mencionar que existe un límite en el que el programa no realiza más cálculos por la gran cantidad de elementos, lo que lleva a que el exceso de nodos afectaría el funcionamiento del programa [35]. Los tipos de mallas más frecuentes usadas son los siguientes:

#### 2.3.2.1. Estructuradas

Este tipo de mallado se constituye por la identificación de cada punto por los índices  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  en el espacio cartesiano [31]. Los elementos hexaédricos tienden a ser los más comunes para resolver un flujo determinado pues la estructura está alineada directamente a las líneas de corriente junto con los contornos sólidos del dominio. La morfología está constituida en bloques y familias topológicas cartesianas totalmente equidistantes formando hexahedros (cubos) donde se cumple  $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ , usando *scripts* se completan las operaciones de repetición; con ello se logra economizar el número de celdas, y las celdas presentan mejor precisión, menor consumo de memoria y un tiempo de cálculo. En las superficies curvas se emplea el mallado curvilíneo (body-fitted) definiendo coordenadas  $(\xi\eta\zeta)$  con isolíneas coincidentes con los puntos de la malla y casos en la que se requiera poner nuevos puntos en el mallado es necesario aplicar el mecanismo de multibloque el cual hace subdivisiones al dominio

en bloques independientes, que posibilita habilitar la desconectividad (non-matching lines) y el de sobreponer las mallas (overlapping grids) [34].

### 2.3.2.2. No estructuradas

Las mallas no estructuradas no contienen un orden específico y no pueden ser identificados por sus índices, la forma que toma la estructura de la malla en el espacio es de cuadrílatos, triángulos, tetraedros y hexaedros [31]. Presenta una ventaja en el área CFD, conforma la posibilidad de generar mallas sobre geometrías arbitrarias, cubriéndolas con celdas tetrahédricas a cualquier dominio tridimensional sin hacer el previo análisis de la topología. Al generar la malla permite efectuar un refinado local sin afectar la distribución de celdas fuera de la zona, lo que resulta la reducción de nodos. Basándose en el gradiente de flujo o en la estimación de errores es posible adaptar la concentración en las zonas de fuertes interacciones que logra un ahorro de gasto computacional, La forma de discretización va en dependencia de las ecuaciones y de la estructura interna de los datos usados para resolver el flujo, el método de volúmenes finitos reemplaza una solución analítica en derivadas parciales que proporciona de  $\phi$  de forma continua en todos los puntos del espacio por una solución numérica aproximada, solo en una serie de puntos discretos por la malla que define el dominio [34].

### 2.3.3. Mecanismos de tratamiento de la turbulencia

Para solución de flujos turbulentos se tiene la posibilidad de aplicar tres métodos con mayor o menor detalle que están en función de la cantidad de energía cinética turbulenta que esté dentro de las ecuaciones constitutivas. Los sistemas de solución están diferenciados en tres tipos: **simulación numérica directa (DNS siglas en inglés)**, para este método es necesario emplear un mallado totalmente muy fino para la solución que van desde las integrales a las disipativas; la **simulación por las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas (RANS)**, en ella todas las escalas se modelan por el uso de modelos de turbulencia; y finalmente la **simulación de vórtices grandes (LES)**, este mecanismo de solución puede emplear mallas menos densas para la solución de turbulencias que transportan el 50 y 80% de la energía cinética [34]. Los detalles de cada método se explicarán en los siguientes puntos.

### 2.3.3.1. Simulación DNS (Direct Numerical Simulation)

Este método de solución plantea que para un fenómeno con una dimensión  $l$ , con un tamaño de escala integral del mismo orden  $L$ , cuanto más elevado es el número de Reynolds es de proporción inversa la escala de Kolmogorov, se deduce que al tener flujos de tipo industrial con números de turbulencia de  $10^5$  a  $10^8$ , es posible hacer un aproximado de la cantidad de nodos necesarios en una simulación tridimensional para resolver las microescalas del flujo. La separación de cada nodo  $\Delta x$ , deben ser del mismo orden, por lo tanto:  $\delta x \sim \eta \sim Re^{-3/4}L$ . Ahora bien al tener el tamaño del dominio que comprende el flujo  $L_{sim}$  es posible calcular la cantidad de nodos necesarios para una solución espacial del orden de las escalas de Kolmogorov en dirección  $x$  de acuerdo con la siguiente expresión:

$$N_x \simeq \frac{L_{sim}}{\Delta x} \sim \frac{L_{sim}}{L} Re^{3/4} \quad (2.16)$$

Teniendo la tridimensionalidad e isotropía de las escalas disipativas, y puesto un dominio de simulación, se necesitará un detallado de la malla similar al cálculo de la ecuación 2.16 en cada una de la orientaciones espaciales, la discretización queda de la forma:

$$N_{\Omega} \simeq N_x N_y N_z \simeq \left(\frac{L_{sim}}{L}\right)^3 Re^{9/4} \quad (2.17)$$

Secuencialmente, el número de celdas adecuadas para efectuar una DNS tridimensional del orden del número de Reynolds por arriba de 10,000 será forzoso utilizar 1,000 millones de nodos [34].

### 2.3.3.2. Simulación RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes)

Los modelos RANS se basan en la promediación de las ecuaciones del fluido (Navier-Stokes), para lo cual las magnitudes se sustituyen por la suma de su valor medio y una componente fluctacional, a partir de ella se obtienen términos adicionales dando la necesidad de introducir otras ecuaciones para poder cerrar el sistema. El operador que encuentra el mecanismo de trabajo estadístico de las variables del flujo es un promedio temporal sobre las ecuaciones de transporte y permite fragmentar cualquier variable en su valor medio y su parte fluctante como:  $f' = f - \langle f \rangle$ , lo que en ella se genera un término adicional denominado *Tensiones de Reynolds*. Cuando se

aplica la ecuación 2.18 sobre las ecuaciones de flujo, es posible describir la evolución de las variables promediadas. La modelación consiste en eliminar el problema de cierre con algún tipo de suposición que simule el comportamiento de la turbulencia para ello se introduce el modelo algebraico de longitud de mezcla, en él se introduce una viscosidad artificial como la de *K-epsilon* [34].

$$\langle f \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(t) dt \quad (2.18)$$

### 2.3.3.3. Simulación LES (Large eddy simulation)

La aproximación LES es similar a la DNS, en él se presenta las ecuaciones de Navier-Stokes con soluciones tridimensionales, dependencia del tiempo con un sistema de malla muy fino, tiene la ventaja de poder resolver problemas de flujos industriales con números de Reynolds muy altos. Para aplicar la técnica, éste trabaja con dos etapas: el filtrado espacial de ecuaciones convolucionadas y el modelado de las escalas turbulentas aplicando una viscosidad artificial; para efectuar las etapas del mecanismo LES emplea un promediado espacial, fijando el tamaño del filtro  $\Delta$  que funciona como límite entre cada etapa [34]. El filtrado consiste en que las ecuaciones de Navier-Stokes sean definidas en un campo de velocidad con fluctaciones de macroescala de la velocidad instantánea, para ello se aplica un operador de convolución que proporciona una media local del flujo turbulento y está definida por:

$$\bar{f}(x) = \int_{\Omega} f(\vec{x}) G(\vec{x}, \vec{x}', \Delta) d\vec{x}' \quad (2.19)$$

Donde  $G(\vec{x}, \vec{x}', \Delta)$  es la función de filtrado o núcleo del operador en la que va en dependencia del tamaño del filtro, que aumenta cuando  $\vec{x}$  y  $\vec{x}'$  son próximos entre sí; es necesario que se cumpla:

$$\int_{\Omega} G(\vec{x}, \vec{x}', \Delta) d\vec{x}' = 1 \quad (2.20)$$

---

# Capítulo 3

## Metodología

Este trabajo está compuesto por dos apartados, el primero es de carácter experimental mientras que la segunda se compone por un modelado a través de herramientas numéricas. En la primera sección se describe el método experimental, los equipos de medición utilizados y su operación, así como los dispositivos que hacen posible la experimentación; como son el biodigestor, la estufa, sistema de compresión, etc. En el segundo apartado se presenta la metodología numérica utilizada, en él se describe la herramienta numérica y la configuración usada, también se explica como se extraen parámetros como eficiencia y calor cedido a partir de los campos.

### **3.0.1. Dispositivos y sus conexiones**

El trabajo experimental se categorizó en dos partes; la primera consta de un conjunto de dispositivos para la generación del combustible. La segunda sección consta de un conjunto de dispositivos en los que se lleva a cabo la combustión y se evalúa el cedimiento de calor.

### 3.0.1.1. Primera parte (Generación y almacenamiento del combustible)

La primer parte está constituida por un conjunto de equipos que se encargan de generar biogás y comprimirlo. El primer componente es el biodigestor que es un contenedor hermético que produce una reacción anaeróbica por medio de la introducción de una mezcla de materia orgánica en dependencia de la capacidad de almacenamiento; la primer carga sirve como inicialización del proceso, con un tiempo de duración de aproximadamente 19 días. Es importante mantener la materia en agitación frecuente, en el proceso se realizará de manera diaria, de este modo se impide que se endurezca y los gases retenidos suban a la superficie. Una vez que los gases son liberados del biodigestor se hacen pasar por una segunda etapa, la cual consiste en un encapsulado de birutas y limaduras de óxido de hierro ( $FeO_3$ ) en que se filtra el  $H_2S$  (compuesto corrosivo para salud y equipos). El gas resultante filtrado es conducido a una bolsa de geomembrana de aproximadamente  $1 m^3$  que condensa en líquidos a algunos vapores, además el uso de este prealmacenamiento permite analizar con facilidad la composición de los gases. Por último la bolsa es conectada a un compresor de 1/2 HP que envía el biogás a un tanque de almacenamiento con capacidad de 15 kg, la presión máxima del compresor es de 300 psi, el biogás será llevado a temperatura ambiente y a una presión de 100 psi; para garantizar la seguridad, el proceso de compresión es monitoreado en todo momento revisando fugas y sobrecalentamiento del compresor (ver figura 3.1).

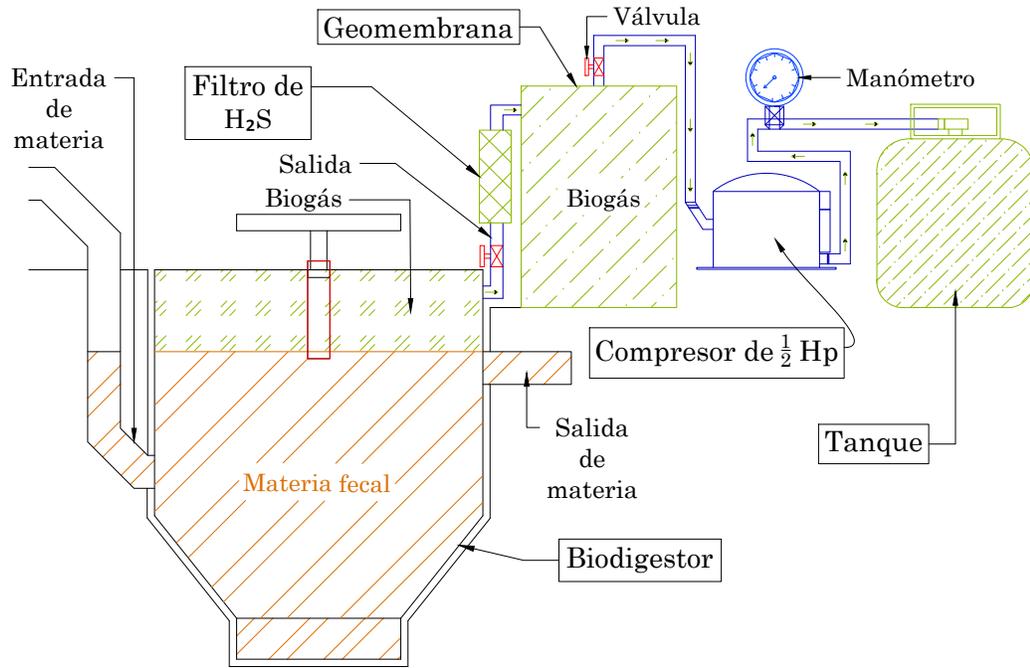


Figura 3.1: Diagrama del sistema de generación y compresión del biogás.

#### ■ Pasos para la generación y compresión de biogás

- Realizar la mezcla homogénea de materia orgánica a una razón de 1 kg de estiércol a 1.5 kg de agua.
- Llenar el biodigestor con mezcla hasta un 70 % y esperar un tiempo de 19 días con agitación diaria.
- Conectar la bolsa de geomembrana y esperar a que se llene.
- Realizar evaluación de composición de gases del biogás prealmacenado.
- Llenar el tanque con el biogás capturado en la bolsa sin sobrepasar los 100 psi.

### 3.0.1.2. Segunda parte: Combustión

La segunda parte consta del tanque que es removido de la primer sección de componentes, este es conectado a través de tuberías y un flujómetro para biogás a la estufa donde se realiza la combustión del biogás (ver figura 3.2). La estufa dispone de 4 quemadores de los cuales solo uno se usará, dicho quemador cuenta con un incremento en la sección transversal de las perillas a una razón del doble de las perillas comerciales. La hornilla es de morfología cilíndrica con 60 orificios (pequeños elipses) en el costado, éstos dividen el flujo de combustible para una distribución circular en la parte superior. Un recipiente de aluminio es colocado por encima 7 milímetros de la hornilla con 1 kg de agua a temperatura ambiente.

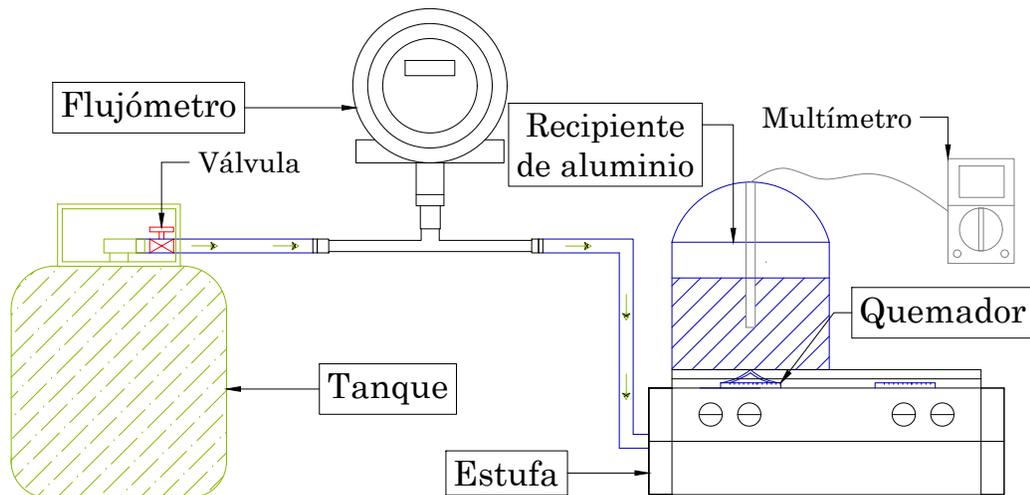


Figura 3.2: Diagrama de conexiones para la combustión.

- **Pasos para hacer la prueba de combustión.**

- Conectar el tanque al flujómetro verificando la línea de flujo.
- Conectar el otro extremo del flujómetro a la estufa.
- Llenar el recipiente de aluminio con un kilogramo de agua.
- Abrir la perilla de la hornilla en su totalidad para tener un flujo máximo de biogás.
- Colocar sensor de temperatura en el centro del recipiente sumergido en el agua sin tocar fondo.
- Encender la estufa.
- Tomar lectura de los sensores cada 2 minutos.

Los pasos mencionados anteriormente son basados en la metodología de la norma mexicana NOM-025-ENER-2013 que es para la determinación de eficiencia térmica de estufas.

## **3.1. Apartado numérico**

La simulación de fluidos por computadora (CFD siglas en inglés) ha tomado importancia en la ingeniería debido a la disminución del número de pruebas experimentales requeridas para desarrollar un producto final, lo que conlleva a una reducción de costos del producto. La simulación con CFD puede reproducir la física de fenómenos simples como un fluido hidrostático, hasta fenómenos más complejos como la combustión, fluidos no Newtonianos, fluidos multifase, etc. Dentro de la bibliografía consultada se destacan tres pasos fundamentales: el pre-procesamiento, procesamiento y el post-procesamiento. Estos pasos son comúnmente usados en la mayoría de los softwares comerciales y no comerciales de CFD y que serán usados para presentar la metodología que involucra este proyecto.

### **3.1.1. Pre-procesamiento**

En este trabajo se pretende reproducir el comportamiento físico de la combustión mediante CFD del biogás en una estufa comercial. En esta primer etapa de pre-

procesamiento se tiene que conocer el modelo físico y la geometría involucrada. A continuación se presentan dos etapas en las que el pre-procesamiento fue dividido, la primera consiste en definir un modelo que describe la sustancia a estudiar, la segunda en generar la geometría CAD del arreglo experimental, extraer el dominio de flujo y generar la malla.

#### **3.1.1.1. Modelo físico del dominio**

A partir del análisis de la experimentación se podrá definir las partes y las interacciones involucradas, de acuerdo a los pasos siguientes:

- Identificar las partes con influencia en funcionamiento global.
- Identificar las interacciones de cada una de las partes.
- Definir los modelos matemáticos que describen a las partes con sus interacciones.

#### **3.1.1.2. Generación de bosquejo CAD del quemador**

En el presente trabajo se va a llevar a cabo la combustión de biogás por medio de una estufa de grado comercial, que cuenta con 4 quemadores distribuidos en pares y montados de forma concéntrica. En la metodología experimental se usará el quemador céntrico, el cual será bosquejado con sus componentes fundamentales, como son los 60 agujeros para la distribución de calor y el recipiente montado sobre él. El bosquejo será representado en un diseño CAD con medidas y características necesarias para ser abordado en el siguiente paso de generación de malla.

#### **3.1.1.3. Dominio del flujo y malla**

Con el bosquejo CAD realizado se podrá identificar la sección en la que el fluido tendrá trayectoria, también llamado dominio de flujo o volumen de control. Este volumen de control está delimitado por las fronteras de la olla, las fronteras de la hornilla, una entrada y una salida de flujo. La entrada será distribuida en 60 porciones de forma rectangular para garantizar una estructura en su mayor composición

hexaédrica. Para la salida se definiran fronteras que son equivalentes en el experimento a una conexión con la atmosfera. El procedimiento para generar el dominio de flujo se basará en la generación de mallas de blockMesh, que a continuación se presenta la estructura y cada una de sus partes del archivo:

- Escala: configura la unidad en metros a la cual se requiera trabajar, se introduce,
  - **convertToMeters**  $n$ ;
- Vértices: agrega los puntos del volumen de control en coordenadas espaciales (x y z), enumerándola a partir de 0, el formato es,
  - **vertices** (  $(n_x \ n_y \ n_z)$  );
- Bloque: toma 8 vértices para determinar la dirección de la división espacial y el tipo de crecimiento, el formato es el siguiente,
  - **blocks** ( **hex**  $(v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_3 \ v_4 \ v_5 \ v_6 \ v_7 \ v_8)$   $(n_1 \ n_2 \ n_3)$  **simpleGrading**  $(m_1 \ m_2 \ m_3)$  );
- Aristas: una vez definidos los bloques las aristas toman una forma lineal por default, si se requiere una arista curva, en esta sección se define, con el siguiente formato,
  - **edges** ( **arc**  $v_1 \ v_2$   $(x_{arc} \ y_{arc} \ z_{arc})$  );
- Fronteras: en esta sección se etiquetan las fronteras del dominio de flujo y se hacen con el siguiente formato,
  - **boundary** ( “etiqueta” { **type** **wall**; **faces** (“puntos de la cara”); } );
- Unión de caras: en esta parte se define las fronteras que van a fusionarse y permitirán al fluido atravesar dichas fronteras, se introduce el siguiente formato,
  - **mergePatchPairs** (“etiqueta 1” “etiqueta 2” );

Por facilidad de funcionamiento, el dominio de flujo será generado en dos partes, la primera toma en cuenta las fronteras del recipiente, de la hornilla y las limitaciones a la atmósfera, la segunda contempla los orificios de entrada de combustible, estas dos partes serán unidas en un solo archivo de malla. Posterior a ello se ejecutará la revisión de la malla con el comando “checkMesh”, el cual otorgará las características que componen la malla, en esta sección de datos, se extraerá información relacionada con la calidad de la malla.

### 3.1.2. Procesamiento

#### 3.1.2.1. Condiciones de frontera

El sistema será estudiado en régimen transitorio, sin embargo el interés está cuando se encuentre en estado estacionario. Por tanto se tienen que definir las condiciones iniciales y las de frontera del sistema. De forma general se clasifican a las fronteras del dominio de flujo en 3 tipos:

- Entrada.
- Salida.
- Muro.

En cada una de las fronteras del dominio de flujo, las variables pueden adoptar la forma **Dirichlet** o **Neumann**, según las condiciones experimentales. Por último se definirán las condiciones iniciales que deben tener los campos de cada variable involucrada. Para lo cual serán definidas:

1. Especies involucradas.
2. Reacciones químicas involucradas.
3. Porcentajes de cada sustancia.
4. Esquemas de solución espaciales y temporales.
5. Lanzamiento de corridas en una supercomputadora.

### 3.1.3. Post-procesamiento

El post-procesamiento consistirá en la selección de una variable de control para definir que el sistema y sus partes se encuentran en estado estacionario. Se extraerá la transferencia de calor mediante la convección y radiación, que serán calculadas según OpenFoam con la expresión:

$$\alpha_{effe} \cdot \nabla h_e + qr \quad (3.1)$$

$$\alpha_{effe} = \left( \frac{\rho \cdot v_t}{Pr_t} \right) + \frac{K}{Cp} \quad (3.2)$$

Donde:  $\alpha_{effe}$  es la difusividad térmica efectiva;  $\nabla h_e$  es el gradiente normal de entalpía;  $K$  es la conductividad térmica;  $Cp$  es la capacidad calorífica a presión constante;  $Pr_t$  es el número de Prandtl turbulento;  $\rho$  es la densidad;  $v_t$  es la viscosidad cinemática turbulenta;  $qr$  es el flujo de calor por radiación que de acuerdo a la literatura [36] es calculado por el Método de ordenadas discretas de volumen finito (FVDOM). De acuerdo a la literatura es en el fondo del recipiente donde se encuentra una mayor influencia en el calor cedido [37], por tanto esta expresión será estimada en el fondo, con ello se extraerá la eficiencia térmica del proceso de combustión mediante la expresión:

$$\eta = \frac{\alpha_{effe} \cdot \nabla h_e + qr}{\sum_{i=1}^N \dot{m}_{fuel} \cdot \%_{fuel} \cdot PCI_{fuel}} \quad (3.3)$$

Donde:  $\dot{m}$  es el flujo másico del combustible;  $\%_{fuel}$  es el porcentaje de combustible;  $PCI_{fuel}$  es el poder calorífico inferior del combustible.

---

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Resultados del apartado experimental

De acuerdo con la metodología, en ese apartado se presenta los resultados experimentales. Estos también fueron divididos en dos partes: generación-almacenamiento y combustión.

#### 4.1.1. Parte 1: resultados de la generación y compresión del biogás

La generación de biogás parte desde el biodigestor DM1, en el que para su funcionamiento se le introdujo una mezcla de estiércol-agua a una razón de 1-1.5 kg respectivamente, la carga inicial correspondió en llenar el equipo a una capacidad del 70 %, esperando 19 días para la activación de las bacterias teniendo la agitación diaria, posterior a los 19 días se agregó más materia cada 4 días. De acuerdo con el sistema de conexiones, el biogás se purificó con el filtro de  $H_2S$  (encapsulado de birutas de óxido de hierro o  $FeO_3$ ), para luego prealmacenarlo en la bolsa de geomembrana (Figura 4.1) y analizar su composición con el equipo GEM 5000 GAS ANALYSER, en la tabla 4.1 se muestra la composición y los porcentajes de cada componente:



Figura 4.1: Bolsa de prealmacenamiento.

Compuestos	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3
$CH_4$ %	50	48.9	52
$CO_2$ %	52	45.6	47
$O_2$ %	0.9	1.8	1
$H_2$ PPM	19	10	2
$H_2S$ PPM	32	31	31

Tabla 4.1: Composición del biogás.

Posteriormente se conectó todo el sistema de turberías para realizar la compresión (bolsa de geomembrana, compresor y tanque). Listas las conexiones se echó a andar el proceso y se estuvo monitoreando posibles fugas y que el compresor no se sobrecalentara. El proceso de llenado al tanque llevó 15 minutos pero se hizo en lapsos de 5 minutos hasta alcanzar una presión de 100 psi en el tanque, en esta etapa se logro almacenar aproximadamente un metro cúbico de biogás con un porcentaje de 50 % de  $CH_4$  (ver figura 4.2).



Figura 4.2: Sistema de compresión del biogas

### 4.1.2. Parte 2: resultados de la combustión

La prueba fue llevada en una habitación aislada de corrientes de viento, se colocó todo el equipo de trabajo asegurando las conexiones para evitar posibles accidentes, el sistema estuvo compuesto por:

- Tanque.
- Flujómetro SAGE 200 THERMAL MASS FLOW METERS, con precisión estándar de  $\pm 0.5\%$  y resolución de 1000:1(ubicado posterior al tanque).
- Estufa para biogás.
- Recipiente de aluminio (centrado al quemador a una altura de 7 mm).
- Termopar FLUKE 179 tipo K, con rango de temperatura de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C} - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $\pm (1\% + 10)$ (centrando el sensor bajo el agua).

Al iniciar la prueba, se encendió el quemador con la perilla abierta a máxima capacidad, se contempló un cronómetro, para que se tomara el tiempo del inicio de la prueba hasta que se concluyera. El gas contenido en el tanque, contuvo el flujo casi constante con una duración de 15 minutos, tres datos fueron capturados; tiempo, flujo de biogás y temperatura del agua en la olla, estos son mostrados en la tabla 4.2.

Prueba 1		
Tiempo (Min)	Flujo (NCMH)	Temperatura °C
0	0	31.1
2	0.2	44
4	0.15	59.7
6	0.15	73
8	0.15	83.5
10	0.15	90
12	0.15	91
14	0.15	92
Prueba 2		
0	0	28.8
2	0.2	40
4	0.1	52.8
6	0.1	65.9
8	0.1	76
10	0.1	83
12	0.1	89.4
14	0.1	90.5
14.3	0.1	91.2
Prueba 3		
0	0	30.8
1.3	0.3	46.4
4	0.1	62
6	0.1	75
8	0.1	84
10	0.1	89
12	0.1	91
14	0.1	91.5
16.25	0.1	91.8

Tabla 4.2: Datos estadísticos de la prueba de eficiencia de la estufa.

A continuación se presenta un gráfico donde se describe el comportamiento de flujo del biogás en el tiempo. Después de los 4 minutos de evaluación, el flujo se reguló de manera casi constante, en las tres evaluaciones. Cabe mencionar que la desviación estándar entre los datos también se mantuvo constante y para la temperatura del agua en la olla se muestra un incremento paulatino pero que se va estancado cuando se alcanza la temperatura máxima. De acuerdo a la metodología, también se muestra la desviación estándar que tuvo la temperatura del agua para las tres pruebas. Puede concluirse que de acuerdo a las desviaciones entre los datos y un comportamiento similar entre las pruebas se logró caracterizar bien al sistema.

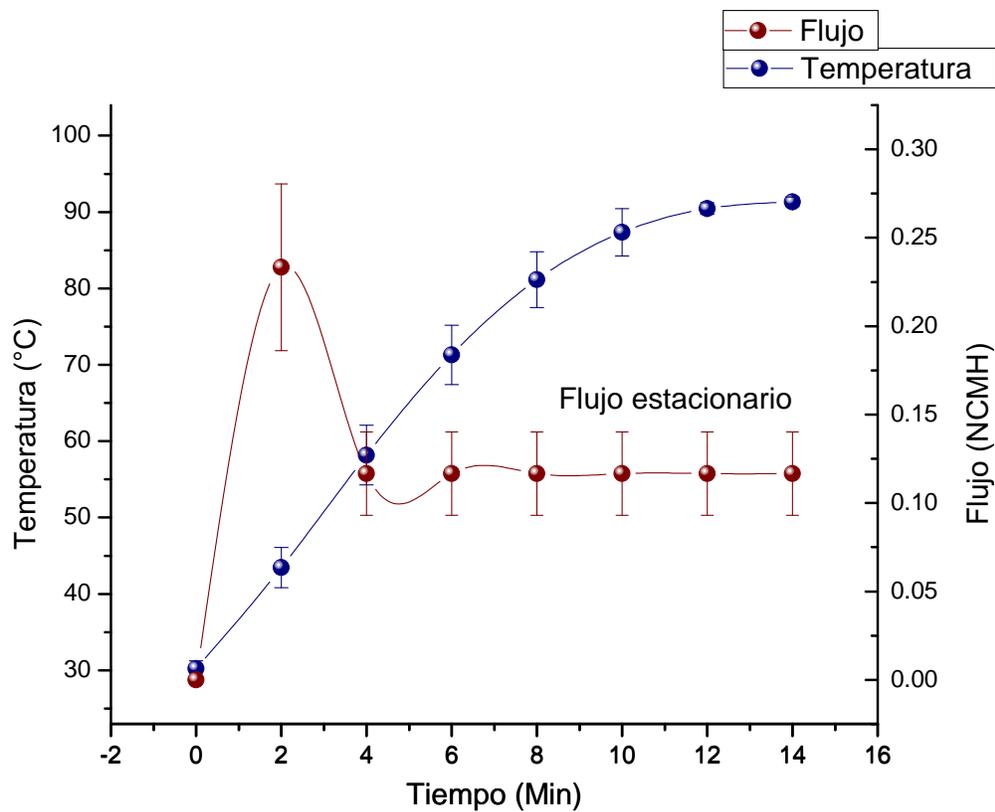


Figura 4.3: Comportamiento del flujo de biogás y de la temperatura del agua en la olla.

## 4.2. Resultados del apartado numérico

A continuación se presentan dos etapas en las que el pre-procesamiento, en la primera se logró determinar la geometría CAD del arreglo experimental, en la segunda parte se extrajo el dominio de flujo y la elaboración de la malla.

### 4.2.1. Resultados del pre-procesamiento

#### 4.2.1.1. Resultados del modelo físico del dominio

El en modelo físico se presentan las partes e interacciones involucradas:

##### ■ Partes

- Una hornilla por la cual el fluido entrará al dominio de flujo, compuesta por 60 agujeros que permiten la entrada de fluido y dan distribución a los gases.
- El gas entrante por la hornilla que tiene una composición de 51%  $CH_4$  y 49%  $CO_2$ . Los porcentajes del gas cambian ya que en cada prueba se añade una porción diferente de  $H_2$ .
- El oxidante, en una atmósfera con una concentración de 23%  $O_2$ .
- El recipiente es de forma cilíndrica con dimensiones de 25.1 cm de diámetro y 16 cm de altura.

##### ■ Interacciones

- El gas entrante tiene interacción con la hornilla de modo que el combustible es distribuido de forma circular.
- El combustible se modela en interacción solamente con el gas  $CO_2$  en la entrada (en realidad existen otros gases, pero por sus proporciones mínimas son despreciados). El  $CO_2$  es modelado como gas inerte y no participa en la generación de energía.
- La mezcla  $CH_4$  y  $CO_2$  entra a una región inundada en un 23%  $O_2$  e interacciona entre si generando un cambio químico y formando  $CO_2$  y  $H_2O$  como producto final.

- Los gases generados en el producto final tienen interacción con el recipiente a través de fenómenos de convección y radiación, los fluidos ceden energía al recipiente.

Las interacciones entre los diferentes fluidos son descritas por las ecuaciones gobernantes de los fluidos y las especies que son presentadas en la sección del marco teórico 2.3.0.2.

#### 4.2.1.2. Resultados del dominio de flujo

En esta sección se presenta el bosquejo CAD donde se muestra las partes del modelo físico. Esta parte del trabajo es importante porque permite construir una imagen mental del dominio de flujo y con ellos construir la malla. El bosquejo resultante de todas las partes es mostrada en la figura 4.4:

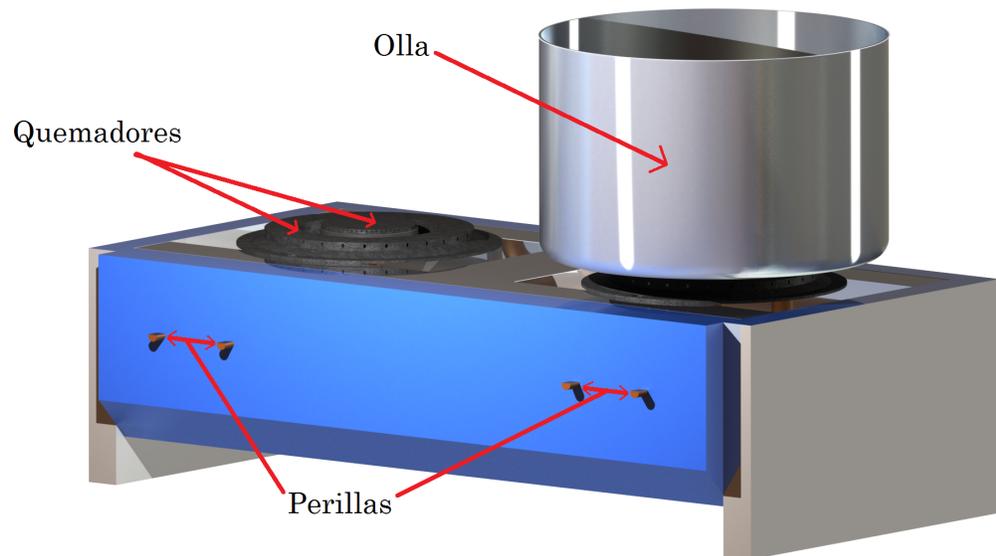


Figura 4.4: Bosquejo CAD de estufa a biogás.

Con el dibujo CAD se identificó el dominio de flujo, que es la región donde las interacciones de las partes tienen lugar. Esto correspondió a una región de volumen que es mostrada en la figura 4.5, puede observarse que dentro de ella encierra a la olla y al quemador.

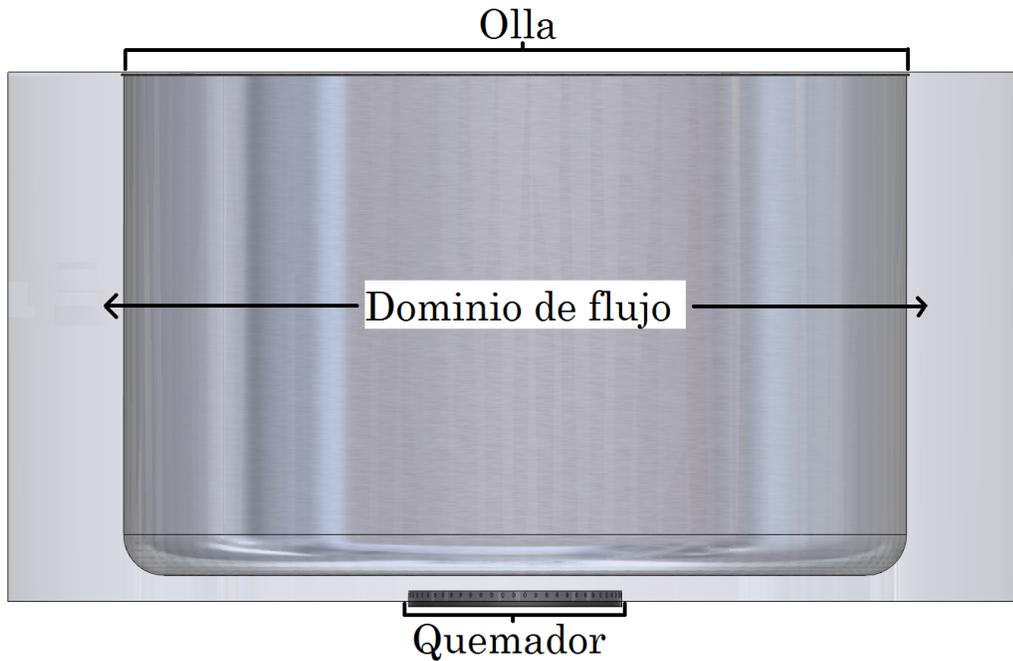


Figura 4.5: Bosquejo CAD del dominio de flujo.

### Resultados de la malla

El dominio de flujo fue construido en dos partes; la primera considera las fronteras del quemador sin los orificios que proporcionan combustible al dominio de flujo y las fronteras de la olla, la segunda toma en cuenta los orificios que son las entradas al volumen de control. Éstas dos partes fueron codificadas en lenguaje blockMesh, ambos archivos se muestran en el anexo [6.2.1 Stove BlockMeshDict](#) y [6.2.2 Burner BlockMeshDict](#). En la figura 4.6 se muestra un corte transversal del dominio de flujo, en el que se hacen resaltar las fronteras que pertenecen a la olla y al quemador sin orificios de entrada.

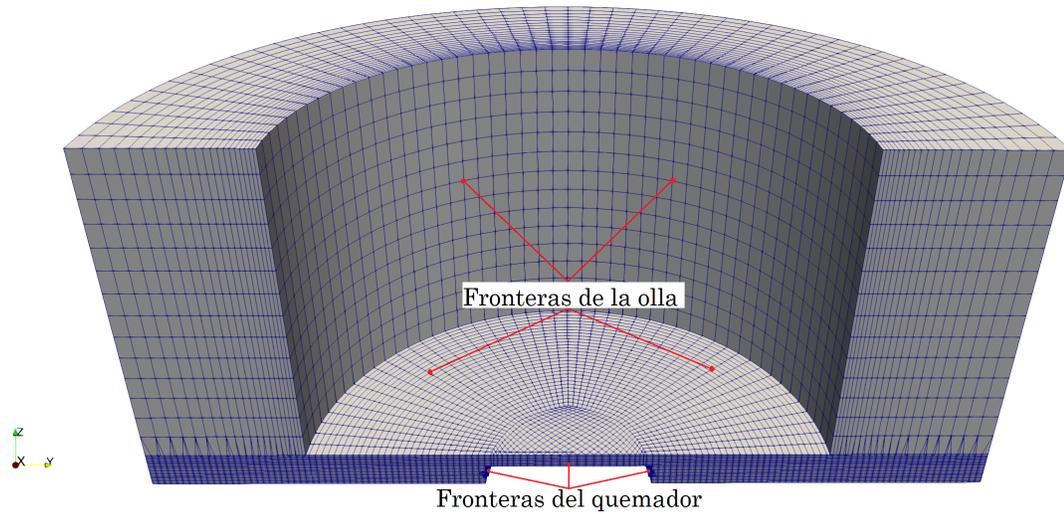


Figura 4.6: Corte transversal del dominio de flujo.

Los orificios de entrada al volumen de control fueron generados en forma cuadrada ya que permitió mantener la malla de forma hexaédrica, el área transversal total se mantuvo aproximadamente igual al área transversal real de la hornilla, la imagen de esta sección de la malla se muestra en la figura 4.7.

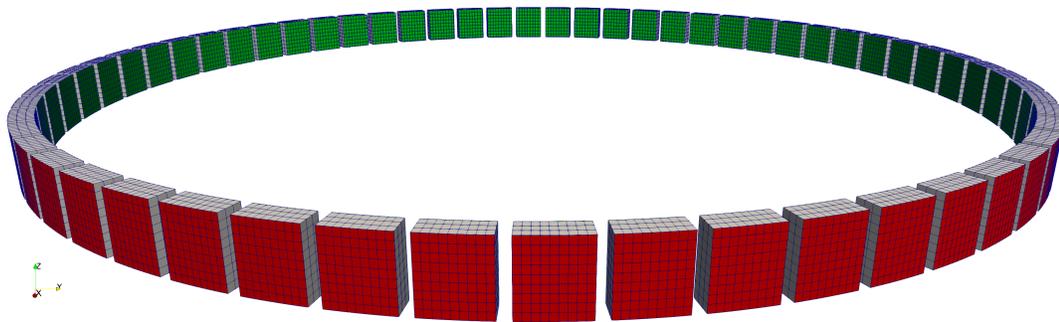


Figura 4.7: Mallado de las entradas del dominio de flujo.

Por último las dos partes fueron unidas en una sola y se extrajeron algunas propiedades para conocer la calidad de la malla, las cuales son mostradas en la tabla 4.3.

Características de la malla	Valores de Stove
Sesgo máximo	2.4278
Relación de aspecto máximo	14.8934
Número de celdas hexaédricas	169,575
Número de celdas poliédricas	19,245

Tabla 4.3: Propiedades de la malla.

### 4.2.2. Resultados del procesamiento

#### Condiciones iniciales y de frontera

La malla fue categorizada en regiones en las cuales se establecieron las condiciones de frontera. Dichas fronteras pueden ser ubicadas en la figura 4.8 y las condiciones establecidas en la tabla 4.4.

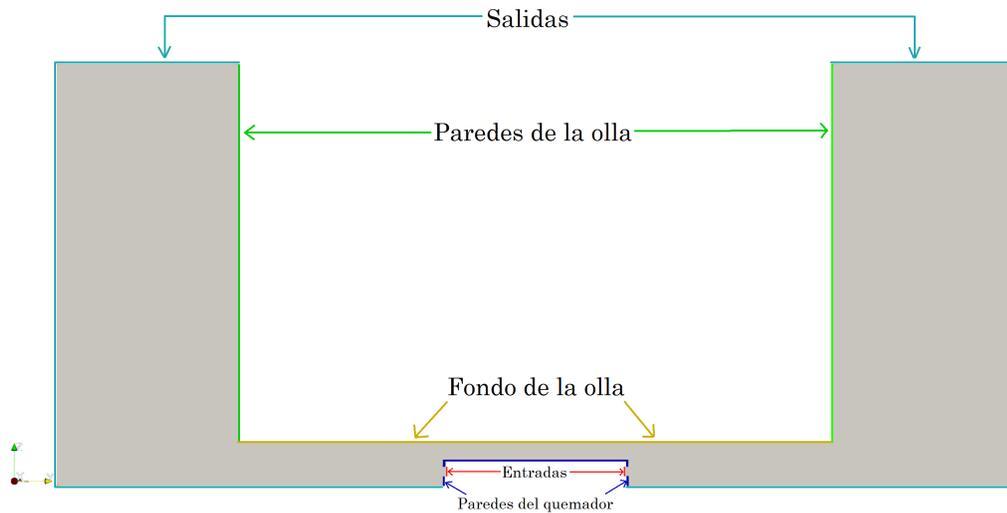


Figura 4.8: Fronteras.

Condiciones de frontera	U	P	T	$CH_4$	$CO_2$	$H_2$	$CO$	$O_2$	$N_2$	$H_2O$
Entrada	Dirichlet	Neumann	Dirichlet						Neumann	Dirichlet
Salida	Neumann		Dirichlet	Neumann						
Paredes de la olla	Dirichlet	Neumann								
Fondo de olla	Dirichlet	Neumann								
Paredes del quemador	Dirichlet	Neumann								
Condiciones iniciales	(0,0,0) m/s	101325 Pa	303 K	0[-]	0[-]	0[-]	0[-]	0.23301[-]	0.76699[-]	0[-]

Tabla 4.4: Condiciones iniciales y de frontera.

**■ Entrada:**

- Velocidad **U**: se fijó un valor másico que es el mismo que el experimental.
- Temperatura **T**: se fijó un valor cercano al experimento.
- Especies  $CH_4$ ,  $CO_2$  y  $H_2$ : se fijó un valor de porcentaje de mezcla que dependió de cada caso de estudio.
- Especies  $CO$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$  y  $O_2$ : se fijó el valor de cero.

**■ Salida:**

- Temperatura **T**: se fijó un valor cercano al experimento.

**■ Paredes de la olla:**

- Velocidad **U**: se fijó el valor de no deslizamiento  $\mathbf{U=0,0,0}$ .

**■ Fondo de la olla:**

- Velocidad **U**: se fijó el valor de no deslizamiento  $\mathbf{U=0,0,0}$ .

**■ Paredes del quemador:**

- Velocidad **U**: se fijó el valor de no deslizamiento  $\mathbf{U=0,0,0}$ .

**■ Las condiciones de tipo Neumann:**

- Se estableció una condición de gradiente cero entre la frontera y el campo interno del dominio de flujo. Para el caso de fondo de la olla y paredes de la olla la temperatura es estimada tomando en cuenta los fenómenos de radiación que recibe la frontera.

### 4.2.3. Resultados del post-procesamiento

La variable de control para determinar el estado estacionario fue el promedio de la temperatura del fondo de la olla. En la figura 4.9 se muestra la evolución temporal de la temperatura a las diferentes proporciones de hidrógeno, todas la pruebas se consiguen llegar al estado estacionario:

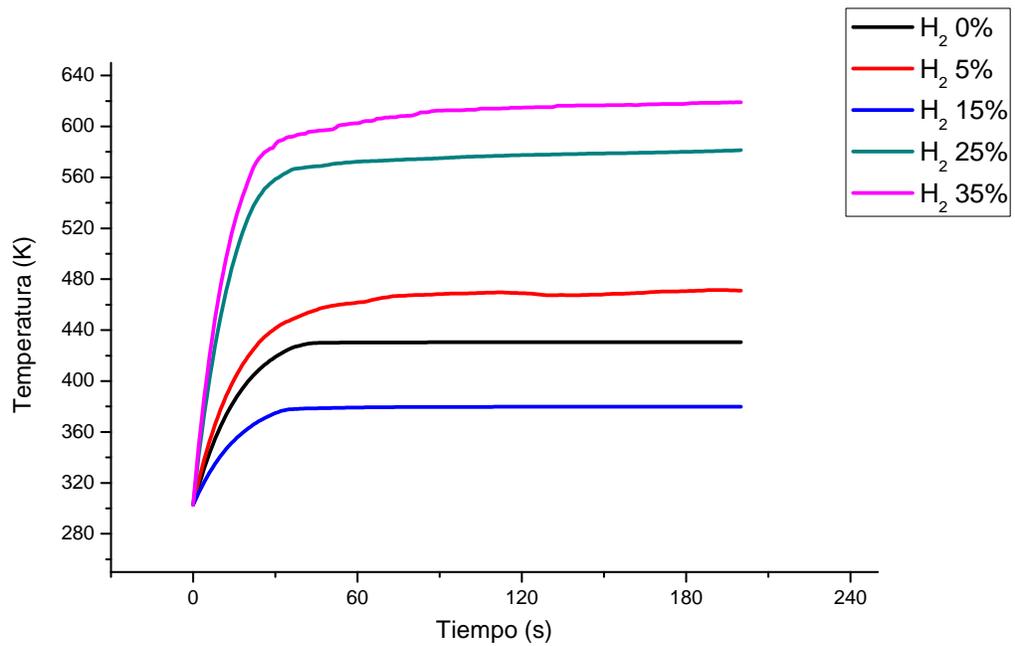


Figura 4.9: Temperatura de la base de la olla a diferentes porciones de  $H_2$ .

Para cada caso se extrajo la eficiencia de acuerdo a la metodología y los resultados son mostrados en la figura 4.10:

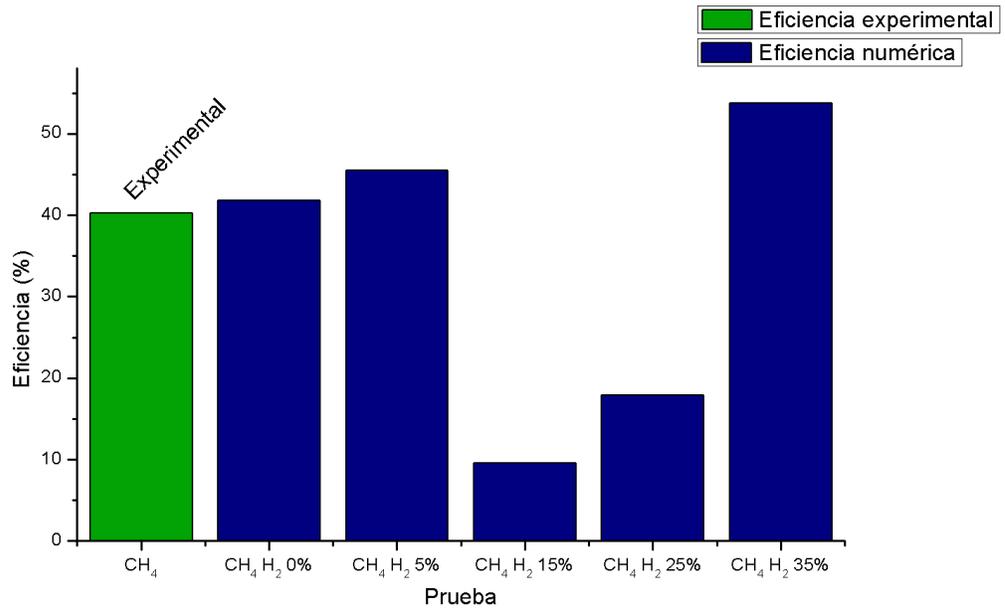


Figura 4.10: Eficiencias: experimental-numérico.

En figura anterior se muestra la eficiencia térmica experimental en la barra de color verde y en las azules las eficiencias térmicas de la simulación con diferentes proporciones de  $H_2$ .

### Comportamiento de las especies

Se calcularon los promedios de las especies resultantes en la salida del dominio de flujo para cada prueba, los resultados son mostrados en la figura 4.11 y 4.12:

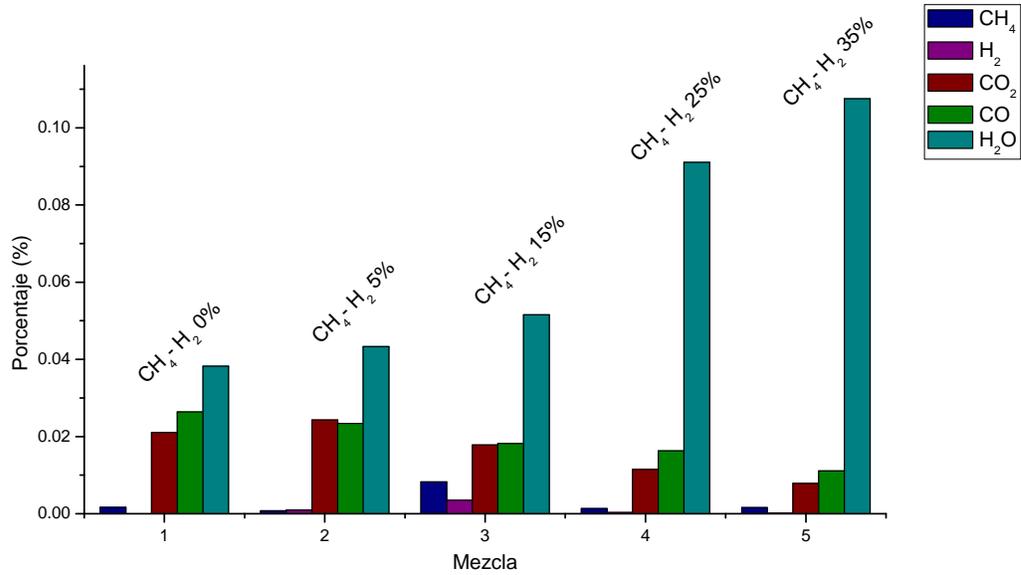


Figura 4.11: Porcentaje de las especies resultantes en la salida.

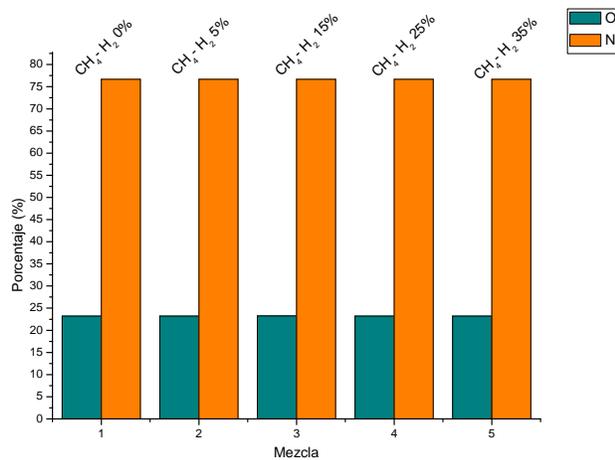


Figura 4.12: Porcentaje de las especies O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> en la salida.

---

# Capítulo 5

## Conclusiones

- Se realizó el acople experimental para la generación, purificación, compresión y combustión del biogás.
- Se logró la producción de biogás con el biodigestor DM1 con una concentración superior del 50%  $CH_4$ , además el gas fue filtrado teniendo una reducción de  $H_2S$  hasta 33 PPM.
- El gas se comprimió y se combustionó en una estufa de grado comercial modificada.
- Durante la prueba experimental de combustión mediante la norma oficial mexicana NOM-025-ENER-2013 <sup>1</sup>, se obtuvo la eficiencia térmica con un promedio de 40.24%. Además la ebullición de agua se realizó en un tiempo promedio de 14 minutos, teniendo un flujo de combustible casi constante.
- Se identificaron las partes del sistema y sus interacciones, logrando construir un modelo físico. Dicho modelo tomó en cuenta las leyes fundamentales de conservación.
- Se logró identificar el volumen de control donde las reacciones ocurrieron, así mismo, se hicieron algunas simplificaciones para optimizar el tiempo de cómputo.

---

<sup>1</sup>determinación de eficiencia térmica de estufas.

- Se desarrolló un código en lenguaje blockMesh que permitió generar el volumen de control junto con las fronteras.
- Las ecuaciones de conservación fueron resueltas mediante las herramientas numéricas (FireFoam) para las diferentes concentraciones de la mezcla (biogás-Hidrógeno).
- Se obtuvieron resultados con convergencia numérica con residuales por debajo  $1E^{-04}$  y monitoreando la temperatura promedio en la olla se alcanzó el estado estacionario como se muestra en la figura 4.9.
- La eficiencia numérica se aproximó a la eficiencia experimental con un margen de error de 3.83 %.
- Mediante la simulación se hicieron evaluaciones con concentraciones de 0, 5, 15, 25 y 35 % de  $H_2$  respecto a la mezcla total. Se encontró que un incremento de 5 % de  $H_2$  produce un incremento de 3.73 % de eficiencia. Agregar 15 y 25 % de  $H_2$  produjo una disminución de 32 y 23 % respectivamente en comparación a la primera prueba (0 %  $H_2$ ). El mejor rendimiento se presentó a la concentración de 35 % con un incremento de 11.97 % con respecto a la primera. Por lo tanto se puede concluir que de acuerdo con los resultados de la simulación agregar un porcentaje de  $H_2$  puede incrementar la eficiencia de la combustión.
- En cada una de las evaluaciones hechas a través de la simulación se presentó conservación de las especies. Se cuantificaron las especies en la salida del dominio de flujo, para la segunda evaluación que contiene un 5 % de  $H_2$ , la simulación mostró un incremento de 15.54 % en la producción de  $CO_2$  y una disminución de 11.26 % de  $CO$  con respecto a la primera evaluación donde no se agregó  $H_2$ , lo que implica una mejora en la combustión de  $CH_4$ . Para la tercera evaluación la simulación mostró una disminución de 15.53 % en la producción de  $CO_2$  y una disminución de 30.96 % en la producción de  $CO$  con respecto a la primera evaluación, por otro lado la simulación muestra un incremento de 393 % de emisión de  $CH_4$  y un incremento de 268 % de emisión de  $H_2$ , esto quiere decir que la combustión se dio de manera incompleta pues se produjeron inquemados. Para la cuarta evaluación, la simulación mostró una

disminución de 45.57% de emisión de  $CO_2$  y una disminución de 38.16% de  $CO$  con respecto a la primera evaluación, por otro lado la simulación mostró un decremento de 20% de la emisión de  $CH_4$  y un decremento de 66% de emisión de  $H_2$ , hay que destacar que en esta cuarta prueba se introduce menos  $CH_4$  que para la primer prueba lo cual es congruente con la disminución de  $CH_4$  a la salida, por otro lado para esta prueba la proporción de hidrógeno es incrementada con respecto a la segunda prueba, sin embargo se dio una disminución en la emisión de  $H_2$  en la salida, lo que significa que se quemó más  $H_2$ . En la prueba final la simulación mostró una disminución de un 62.7% de  $CO_2$  y una disminución de 58% de  $CO$  con respecto a la primer prueba, para esta prueba las emisiones de  $CH_4$  en la salida disminuyeron un 3.71% y para el  $H_2$  las emisiones disminuyeron un 86%, lo que significa que se quemó más  $H_2$ .

- De acuerdo a los resultados de la simulación, se puede concluir que la adición de un porcentaje pequeño de  $H_2$  puede mejorar la combustión del  $CH_4$  como ocurrió en la segunda prueba donde se agregó un 5% de  $H_2$ .
- De acuerdo con los resultados de la simulación, existe un porcentaje límite de adición de  $H_2$  para mejorar la combustión de  $CH_4$ , ya que de acuerdo a la tercera prueba se generaron inquemados y la eficiencia disminuyó, cabe mencionar que para esta tercer prueba hubo un incremento en la generación de  $H_2O$  que probablemente extinguió la flama, evitando el contacto entre el combustible y oxidante.
- Los resultados de la simulación muestran que después de agregar cierto porcentaje de  $H_2$ , el  $H_2$  gana terreno en la combustión, como se muestra en la cuarta y quinta prueba que muestra un incremento notorio en la producción de  $H_2O$  y una disminución de producción de  $CO$  y  $CO_2$ , así como un incremento en la eficiencia.

## 5.1. Trabajos a futuro

1. Encontrar el límite de adición de  $H_2$  para la mezcla de biogás-hidrógeno.
2. Determinar el porcentaje de  $H_2$  que produzca la eficiencia máxima.
3. Hacer variaciones paramétricas en el dominio de flujo.
4. Realizar pruebas experimentales de combustión de las mezclas de acuerdo a los márgenes encontrados.
5. Hacer variaciones en los porcentajes de mezcla, así como probar otros combustibles.

---

# Capítulo 6

## Anexos

### 6.1. Tipos biodigestores

Para la generación de biogás, existen varios equipos que acoplan el mismo concepto para poder generarla, las dimensiones y tipos de manejo, las diferentes culturas las han desarrollado, con la adecuación de la localización del lugar en donde se desean instalar. En los siguientes párrafos se describen los diferentes tipos sistemas de generación de biogás:

#### 6.1.1. Modelo Chino

Este modelo está muy difundido en China, es un digestor de cúpula fija en forma cilíndrica, enterrados con cámaras de Hidropresión. La estructura puede ser de hormigón, de ladrillos, bloques y adobes, se le puede adicionar el gasómetro. Este digestor por estar enterrado favorece el proceso fermentativo, con poca influencia por los cambios de temperatura, la desventaja que presenta es que la presión del gas es variable dependiente del volumen acumulado [38]. (ver figura 6.1).

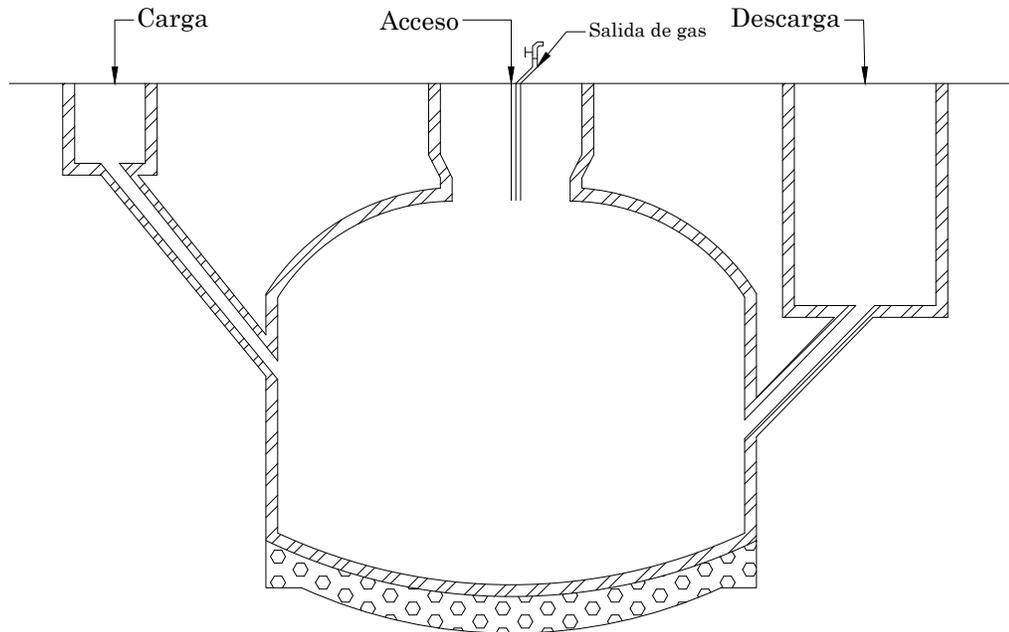


Figura 6.1: Modelo de biodigestor tipo chino.

### 6.1.2. Modelo Indio

Es originario de la India y se ha difundido mucho porque mantiene una presión de trabajo constante, generalmente son verticales, con el gasómetro incorporado (Por lo que se llama digester de Cúpula Móvil), la estructura se construye de bloques y concreto, y el gasómetro es de acero, lo que lo hace costoso (ver figura 6.2). El "Gasómetro" posee una camisa que se desliza en un eje y lo mantiene centrado para que no roce con las paredes, ni es coree, este eje descansa en una viga transversal de concreto armado enjaulado. Estos digestores son de alimentación continua, se construyen generalmente enterrados quedando la cúpula sin gas en un nivel cercano a la superficie del terreno [21].

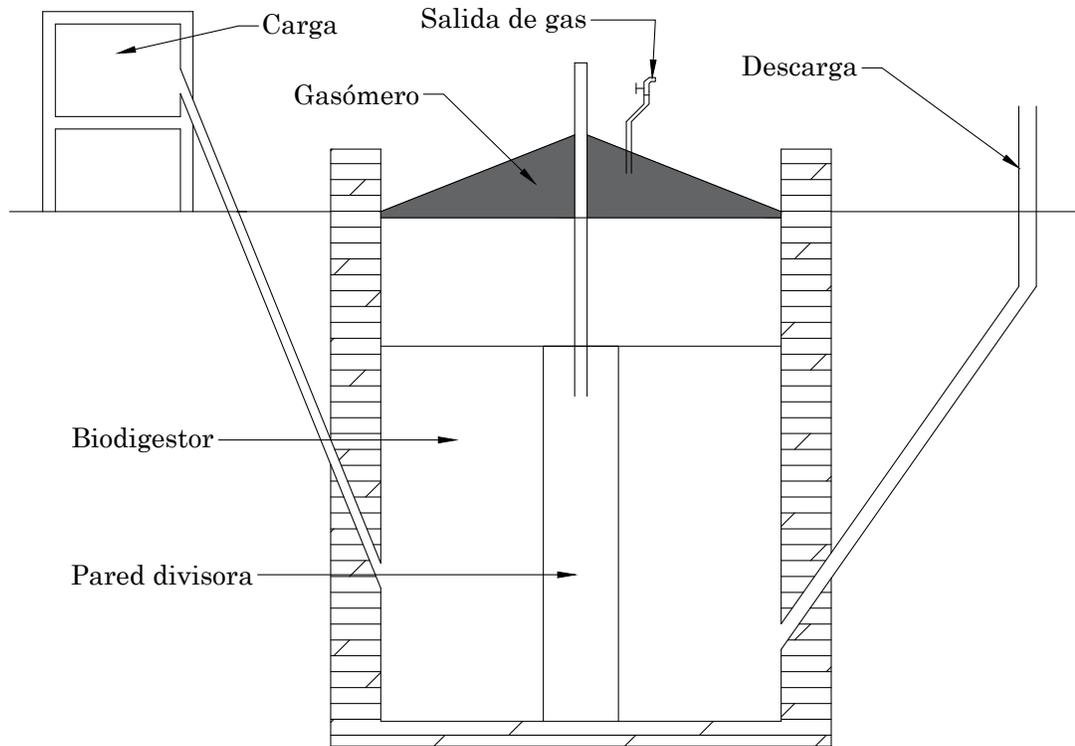


Figura 6.2: Modelo de biodigestor tipo indú.

### 6.1.3. Modelos horizontales

Se habla de biodigestores horizontales cuando estos no profundizan en el suelo, son de forma rectangular, aunque pueden ser cuadrados, se caracterizan por ser en su mayoría de concreto armado debido a las presiones que están sometidos. Su uso es generalmente para el saneamiento de descargas cloacales, ya que su conformación alargada garantiza que el fluente al salir del cuerpo del digestor, debido al flujo pistón y al tiempo de retención sean debidamente degradados (ver figura 6.3). Estos digestores llevan generalmente en la parte superior una pequeña cúpula metálica desmontable que sirve de boca de vista, la presión se controla por el sello de agua, además requieren gasómetro adicional debido a la poca capacidad de almacenamiento

de la cúpula y él en cuerpo del digestor [21].

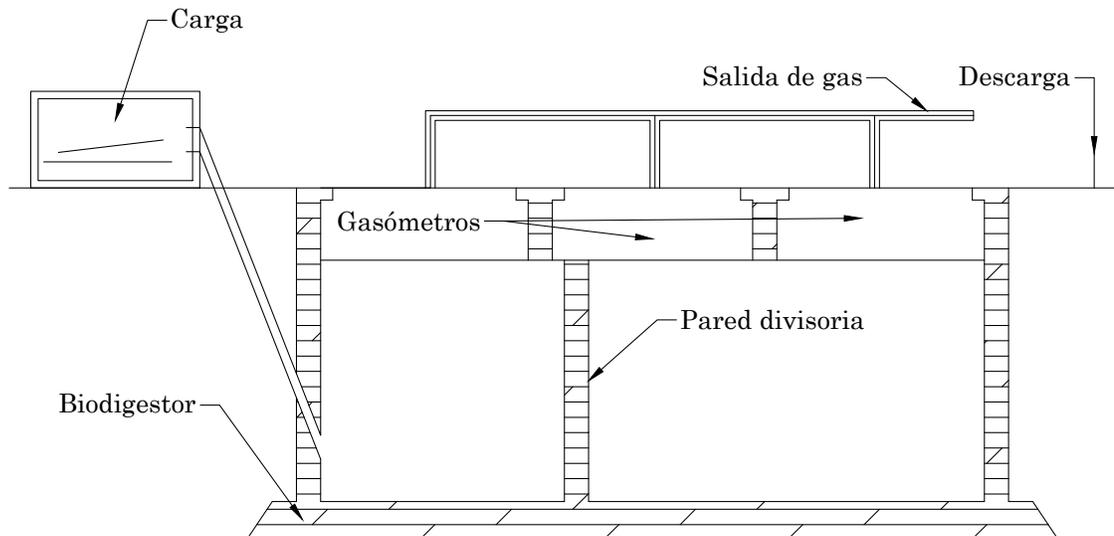


Figura 6.3: Modelo de biodigestor tipo horizontal.

#### 6.1.4. Modelos Batch por lotes

Estos digestores se caracterizan porque se cargan una sola vez, tienen una cúpula metálica con sello de agua, la estructura se construye con bloques y concreto reforzado (Ver figura 6.4); la desventaja es que se debe construir obligatoriamente con un gasómetro y al ser aéreos están afectados por la temperatura ambiental, se utiliza para degradar materias primas sólidas, como restos vegetales, desechos sólidos orgánicos, el requisito básico es utilizar una buena inoculación (5 al 10 % en base al peso), para garantizar una buena fermentación. El rendimiento volumétrico de gas es superior a cualquier digestor continuo (debido al contenido de sólidos totales),

igualmente el rendimiento de abonos sólidos es elevado; por eso este método permite el tratamiento sanitario de desperdicios orgánicos, el control satisfactorio de toda clase de plagas, así como la proliferación de moscas, así mismo la recuperación eficiente y económico del metano y la retención de humus e ingredientes para uso de fertilizantes [38].

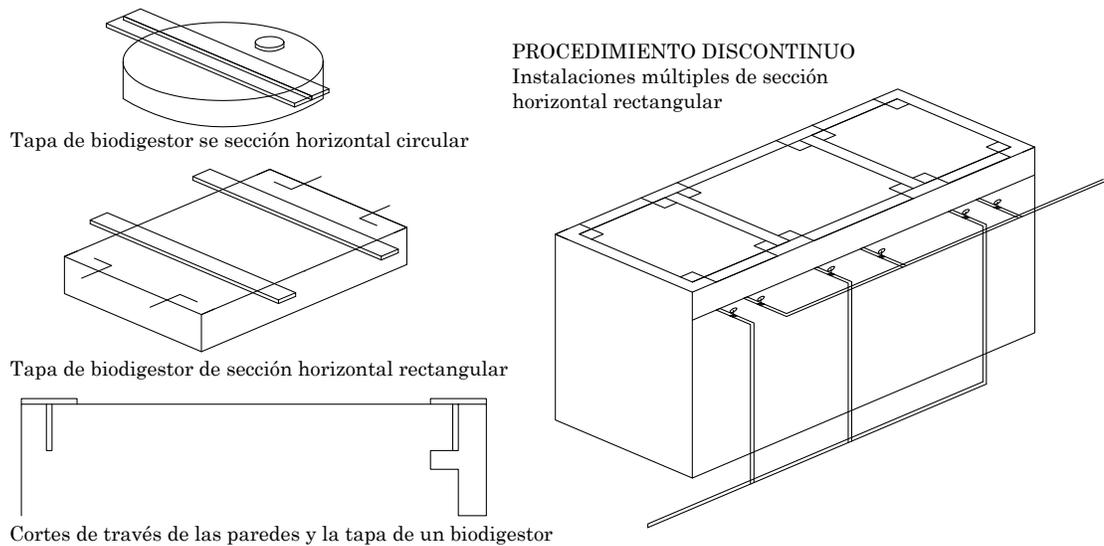


Figura 6.4: Modelo de biodigestor tipo Bach.

## 6.2. Archivo BlockMesh

### 6.2.1. Stove BlockMeshDict

```
/ * - - - - - * - C + + - * - - - - - * \
```

```

|=====|

|\\ /Field |OpenFOAM : TheOpenSourceCFDToolbox|

|\\ /Operation |Version : 2,1,0|

|\\ /And |Web : http://www.OpenFOAM.com|

|\\ / Manipulation | |

\*-----
-----*/

FoamFile

{

version2,0;

formatascii;

classdictionary;

objectblockMeshDict;

}

// *****//
convertToMeters0.01;

vertices
(
(4.0500)//0

```

(20.25 0 0) //1

(0 20.25 0) //2

(0 4.05 0) //3

(-20.25 0 0) //4

(-4.05 0 0) //5

(0 - 20.25 0) //6

(0 - 4.05 0) //7

(4.05 0 1.1) //8

(20.25 0 1.1) //9

(0 20.25 1.1) //10

(0 4.05 1.1) //11

(-20.25 0 1.1) //12

(-4.05 0 1.1) //13

(0 - 20.25 1.1) //14

(0 - 4.05 1.1) //15

(0 0 1.1) //16

(20.25 0 1.1) //17

(0 20.25 1.1) //18

(-20.25 0 1.1) //19

(0 - 20.25 1.1) //20

(0 0 1.8) //21

(20.25 0 1.8) //22

(0 20.25 1.8) //23

(-20.25 0 1.8) //24

(0 - 20.25 1.8) //25

(12.6 0 1.8) //26

(20.25 0 1.8) //27

(0 20.25 1.8) //28

(0 12. 61. 8) //29

(−20. 25 01. 8) //30

(−12. 6 01. 8) //31

(0 − 20. 251. 8) //32

(0 − 12. 61. 8) //33

(12. 6 017. 8) //34

(20. 25 017. 8) //35

(0 20. 2517. 8) //36

(0 12. 617. 8) //37

(−20. 25 017. 8) //38

(−12. 6 017. 8) //39

(0 − 20. 2517. 8) //40

(0 − 12. 617. 8) //41

(3. 75 01. 1) //42

(0 3. 75 1. 1) //43

(−3. 75 01. 1) //44

(0 − 3. 75 1. 1) //45

(2. 5 2. 5 1. 1) //46

(−2. 5 2. 5 1. 1) //47

(−2. 5 − 2. 5 1. 1) //48

(2. 5 − 2. 5 1. 1) //49

(3. 75 01. 8) //50

(0 3. 75 1. 8) //51

(−3. 75 01. 8) //52

(0 − 3. 751. 8) //53

(2. 5 2. 51. 8) //54

(−2. 5 2. 51. 8) //55

(−2. 5 − 2. 51. 8) //56

(2. 5 − 2. 51. 8) //57

```

(14. 318886 14. 3189386 1. 1) //58
(-14. 318886 14. 3189386 1. 1) //59
(-14. 318886 - 14. 3189386 1. 1) //60
(14. 318886 - 14. 3189386 1. 1) //61

(14. 318886 14. 31893861. 8) //62
(-14. 318886 14. 31893861. 8) //63
(-14. 318886 - 14. 31893861. 8) //64
(14. 318886 - 14. 31893861. 8) //65

);
blocks
(
hex(0 1 2 3 8 9 10 11) (54 36 12) simpleGrading (1 1 1)
//1
hex(3 2 4 5 11 10 12 13) (54 36 12) simpleGrading (1 1 1)
//2
hex(54 6 7 13 12 14 15) (54 36 12) simpleGrading (1 1 1)
//3
hex(7 6 1 0 15 14 9 8) (54 36 12) simpleGrading (1 1 1)
//4

hex(26 27 28 29 34 35 36 37) (21 24 14) simpleGrading (

(
(0.05 0.15 5) //20 %x - dir, 30 %cells, expansion = 4
)
1 //y - direction expansion ratio
1 //z - direction expansion ratio
)
//9

```

```

hex (29 28 30 31 37 36 38 39) (21 24 14) simpleGrading (
    (0.05 0.15 5) //20 %x - dir, 30 %cells, expansion = 4
)
1 //y - direction expansion ratio
1 //z - direction expansion ratio
)
hex (31 30 32 33 39 38 40 41) (21 24 14) simpleGrading (
    (
    (0.05 0.15 5) //20 %x - dir. 30 % cells. expansion = 4
    )
    1 //y - direction expansion ratio
    1 //z - direction expansion ratio
    )
//11
hex (33 32 27 26 41 40 35 34)(21 24 14) simpleGrading (
    (
    (0.05 0.15 5) //20 %x - dir. 30 %cells. expansion = 4
    )
    1 //y - direction expansion ratio
    1 //z - direction expansion ratio
    )
//12
hex (42 46 16 49 50 54 21 57)(12 12 9) simpleGrading (1 1 1) //13
hex (46 43 47 16 54 51 55 21)(12 12 9) simpleGrading (1 1 1) //14
hex (47 44 48 16 55 52 56 21)(12 12 9) simpleGrading (1 1 1) //15
hex (48 45 49 16 56 53 57 21)(12 12 9) simpleGrading (1 1 1) //16

hex (42 17 58 46 50 22 62 54)(55 12 9) simpleGrading (1 1 1) //17

```

*hex* (46 58 18 43 54 62 23 51)(55 12 9) *simpleGrading* (1 1 1) //18  
*hex* (43 18 59 47 51 23 63 55)(55 12 9) *simpleGrading* (1 1 1) //19  
*hex* (47 59 19 44 55 63 24 52)(55 12 9) *simpleGrading* (1 1 1) //20  
*hex* (44 19 60 48 52 24 64 56)(55 12 9) *simpleGrading* (1 1 1) //21  
*hex* (48 60 20 45 56 64 25 53)(55 12 9) *simpleGrading* (1 1 1) //22  
*hex* (45 20 61 49 53 25 65 57)(55 12 9) *simpleGrading* (1 1 1) //23  
*hex* (49 61 17 42 57 65 22 50)(55 12 9) *simpleGrading* (1 1 1) //24

);

*edges*

(  
*arc* 0 3 (2. 8637772 2. 86378772 0)  
*arc* 1 2 (14. 318886 14. 3189386 0)  
*arc* 3 5 (-2. 8637772 2. 86378772 0)  
*arc* 2 4 (-14. 318886 14. 3189386 0)  
*arc* 5 7 (-2. 8637772 - 2. 86378772 0)  
*arc* 4 6 (-14. 318886 - 14. 3189386 0)  
*arc* 7 0 (2. 8637772 - 2. 86378772 0)  
*arc* 6 1 (14. 318886 - 14. 3189386 0)  
  
*arc* 8 11 (2. 8637772 2. 86378772 1. 1)  
*arc* 9 10 (14. 318886 14. 3189386 1. 1)  
*arc* 11 13 (-2. 8637772 2. 86378772 1. 1)  
*arc* 10 12 (-14. 318886 14. 3189386 1. 1)  
*arc* 13 15 (-2. 8637772 - 2. 86378772 1. 1)  
*arc* 12 14 (-14. 318886 - 14. 3189386 1. 1)  
*arc* 15 8 (2. 8637772 - 2. 86378772 1. 1)  
*arc* 14 9 (14. 318886 - 14. 3189386 1. 1)  
  
*arc* 17 58 (18. 7085534 7. 74935669 1. 1)  
*arc* 58 18 (7. 74935669 18. 7085534 1. 1)

*arc* 18 59 (−7. 74935669 18. 7085534 1. 1)  
*arc* 59 19 (−18. 7085534 7. 74935669 1. 1)  
*arc* 19 60 (−18. 7085534 − 7. 74935669 1. 1)  
*arc* 60 20 (−7. 74935669 − 18. 7085534 1. 1)  
*arc* 20 61 (7. 74935669 − 18. 7085534 1. 1)  
*arc* 61 17 (18. 7085534 − 7. 74935669 1. 1)

*arc* 22 62 (18. 7085534 7. 74935669 1. 8)  
*arc* 62 23 (7. 74935669 18. 7085534 1. 8)  
*arc* 23 63 (−7. 74935669 18. 7085534 1. 8)  
*arc* 63 24 (−18. 7085534 7. 74935669 1. 8)  
*arc* 24 64 (−18. 7085534 − 7. 74935669 1. 8)  
*arc* 64 25 (−7. 74935669 − 18. 7085534 1. 8)  
*arc* 25 65 (7. 74935669 − 18. 7085534 1. 8)  
*arc* 65 22 (18. 7085534 − 7. 74935669 1. 8)

*arc* 26 29 (8. 90952908 8. 90956181 1. 8)  
*arc* 27 28 (14. 318886 14. 3189386 1. 8)  
*arc* 29 31 (−8. 90952908 8. 90956181 1. 8)  
*arc* 28 30 (−14. 318886 14. 3189386 1. 8)  
*arc* 31 33 (−8. 90952908 − 8. 90956181 1. 8)  
*arc* 30 32 (−14. 318886 − 14. 3189386 1. 8)  
*arc* 33 26 (8. 90952908 − 8. 90956181 1. 8)  
*arc* 32 27 (14. 318886 − 14. 3189386 1. 8)

*arc* 34 37 (8. 90952908 8. 90956181 17. 8)  
*arc* 35 36 (14. 318886 14. 3189386 17. 8)  
*arc* 37 39 (−8. 90952908 8. 90956181 17. 8)  
*arc* 36 38 (−14. 318886 14. 3189386 17. 8)  
*arc* 39 41 (−8. 90952908 − 8. 90956181 17. 8)  
*arc* 38 40 (−14. 318886 − 14. 3189386 17. 8)  
*arc* 41 34 (8. 90952908 − 8. 90956181 17. 8)

*arc* 40 35 (14. 318886 – 14. 3189386 17. 8)

*arc* 42 46 (3. 315625 1. 21875 1. 1)

*arc* 46 43 (1. 21875 3. 315625 1. 1)

*arc* 43 47 (–1. 21875 3. 315625 1. 1)

*arc* 47 44 (–3. 315625 1. 21875 1. 1)

*arc* 44 48 (–3. 315625 – 1. 21875 1. 1)

*arc* 48 45 (–1. 21875 – 3. 315625 1. 1)

*arc* 45 49 (1. 21875 – 3. 315625 1. 1)

*arc* 49 42 (3. 315625 – 1. 21875 1. 1)

*arc* 50 54 (3. 315625 1. 21875 1. 8)

*arc* 54 51 (1. 21875 3. 315625 1. 8)

*arc* 51 55 (–1. 21875 3. 315625 1. 8)

*arc* 55 52 (–3. 315625 1. 21875 1. 8)

*arc* 52 56 (–3. 315625 – 1. 21875 1. 8)

*arc* 56 53 (–1. 21875 – 3. 315625 1. 8)

*arc* 53 57 (1. 21875 – 3. 315625 1. 8)

*arc* 57 50 (3. 315625 – 1. 21875 1. 8)

);

*boundary*

(

*wall*01

{

*typewall*;

*faces*

(

(8 9 10 11)

(11 10 12 13)

(13 12 14 15)

(15 14 9 8)

);

}

*wall02*

{

*typewall;*

*faces*

(

(42 17 58 46)

(46 58 18 43)

(43 18 59 47)

(47 59 19 44)

(44 19 60 48)

(48 60 20 45)

(45 20 61 49)

(49 61 17 42)

);

}

*wall03*

{

*typewall;*

*faces*

(

(0 8 11 3)

(3 11 13 5)

(5 13 15 7)

(7 15 8 0)

);

}

```
wall04
{
typewall;
faces
(
(50 22 62 54)
(54 62 23 51)
(51 23 63 55)
(55 63 24 52)
(52 24 64 56)
(56 64 25 53)
(53 25 65 57)
(57 65 22 50)
); }
```

```
wall05
{
typewall;
faces
(
(26 27 28 29)
(29 28 30 31)
(31 30 32 33)
(33 32 27 26)
);
}
```

```
wall06
{
typewall;
faces
(
(26 34 37 29)
(29 37 39 31)
```

```
(31 39 41 33)
(33 41 34 26)
);
} outlet1
{
  typepatch;
  faces
  (
  (34 35 36 37)
  (37 36 38 39)
  (39 38 40 41)
  (41 40 35 34)
  );
} ogrid01
{
  typepatch;
  faces
  (
  (42 46 16 49)
  (46 43 47 16)
  (47 44 48 16)
  (48 45 49 16)
  );
}
ogrid02
{
  typewall;
  faces
  (
  (50 54 21 57)
  (54 51 55 21)
  (55 52 56 21)
```



```
{  
  
    version2,0;  
  
    formatascii;  
  
    classdictionary;  
  
    objectblockMeshDict;  
  
}  
// ***** //  
convertToMeters0.01;  
  
    vertices  
(  
  
        vertices  
(  
(4.05 0 0.4) //0  
(3.9 0 0.4) //1  
(3.885159253 0.33990819 0.4) //2  
(4.034588455 0.35298158 0.4) //3  
  
        (4.05 0 0.8) //4  
(3.9 0 0.8) //5  
(3.885159253 0.33990819 0.8) //6  
(4.034588455 0.35298158 0.8) //7  
  
        (4.027813573 0.42334126 0.4) //8  
(3.878635292 0.407661957 0.4) //9  
(3.828345681 0.744156801 0.4) //10
```

(3.975589746 0.77277822 0.4) //11

(4.027813573 0.42334126 0.8) //12

(3.878635292 0.407661957 0.8) //13

(3.828345681 0.744156801 0.8) //14

(3.975589746 0.77277822 0.8) //15

(3.961497371 0.84204429 0.4) //16

(3.814775246 0.810857463 0.4) //17

(3.729587757 1.140252236 0.4) //17

(3.87303344 1.18410809 0.4) //19

(3.961497371 0.84204429 0.8) //20

(3.814775246 0.810857463 0.8) //21

(3.729587757 1.140252236 0.8) //22

(3.87303344 1.18410809 0.8) //23

(3.851777972 1.25152166 0.4) //24

(3.709119528 1.205169003 0.4) //25

(3.589967498 1.523854771 0.4) //26

(3.728043171 1.58246457 0.4) //27

(3.851777972 1.25152166 0.8) //28

(3.709119528 1.205169003 0.8) //29

(3.589967498 1.523854771 0.8) //30

(3.728043171 1.58246457 0.8) //31

(3.69985749 1.64728703 0.4) //32

(3.562825731 1.586276398 0.4) //33

(3.41101462 1.890761556 0.4) //34

(3.54220749 1.96348315 0.4) //35

- (3. 69985749 1. 64728703 0. 8) //36  
(3. 562825731 1. 586276398 0. 8) //37  
(3. 41101462 1. 890761556 0. 8) //38  
(3. 54220749 1. 96348315 0. 8) //39
- (3. 507400406 2. 02500429 0. 4) //40  
(3. 377496687 1. 950004135 0. 4) //41  
(3. 194689777 2. 236952665 0. 4) //42  
(3. 317562461 2. 32298931 0. 4) //43
- (3. 507400406 2. 02500429 0. 8) //44  
(3. 377496687 1. 950004135 0. 8) //45  
(3. 194689777 2. 236952665 0. 8) //46  
(3. 317562461 2. 32298931 0. 8) //47
- (3. 27651533 2. 38053509 0. 4) //48  
(3. 15516291 2. 29236712 0. 4) //49  
(2. 943363081 2. 558635138 0. 4) //50  
(3. 056569354 2. 65704418 0. 4) //51
- (3. 27651533 2. 38053509 0. 8) //52  
(3. 15516291 2. 29236712 0. 8) //53  
(2. 943363081 2. 558635138 0. 8) //54  
(3. 056569354 2. 65704418 0. 8) //55
- (3. 009731898 2. 70998411 0. 4) //56  
(2. 898260346 2. 609614333 0. 4) //57  
(2. 659788133 2. 852284538 0. 4) //58  
(2. 762087676 2. 96198779 0. 4) //59
- (3. 009731898 2. 70998411 0. 8) //60  
(2. 898260346 2. 609614333 0. 8) //61

(2. 659788133 2. 852284538 0. 8) //62

(2. 762087676 2. 96198779 0. 8) //63

(2. 70997306 3. 00974185 0. 4) //64

(2. 609603687 2. 898269932 0. 4) //65

(2. 347071853 3. 114683566 0. 4) //66

(2. 437343847 3. 23447909 0. 4) //67

(2. 70997306 3. 00974185 0. 8) //68

(2. 609603687 2. 898269932 0. 8) //69

(2. 347071853 3. 114683566 0. 8) //70

(2. 437343847 3. 23447909 0. 8) //71

(2. 380523051 3. 27652407 0. 4) //72

(2. 292365553 3. 15517133 0. 4) //73

(2. 008640442 3. 34295731 0. 4) //74

(2. 085895844 3. 47153259 0. 4) //75

(2. 380523051 3. 27652407 0. 8) //76

(2. 292365553 3. 15517133 0. 8) //77

(2. 008640442 3. 34295731 0. 8) //78

(2. 085895844 3. 47153259 0. 8) //79

(2. 024991411 3. 50740784 0. 4) //80

(1. 949991729 3. 37750385 0. 4) //81

(1. 648201844 3. 534604742 0. 4) //82

(1. 711594223 3. 67055108 0. 4) //83

(2. 024991411 3. 50740784 0. 8) //84

(1. 949991729 3. 37750385 0. 8) //85

(1. 648201844 3. 534604742 0. 8) //86

(1. 711594223 3. 67055108 0. 8) //87

(1. 647273438 3. 69986354 0. 4) //88  
(1. 586263311 3. 562831558 0. 4) //89  
(1. 269705117 3. 687526124 0. 4) //90  
(1. 318539929 3. 82935405 0. 4) //91

(1. 647273438 3. 69986354 0. 8) //92  
(1. 586263311 3. 562831558 0. 8) //93  
(1. 269705117 3. 687526124 0. 8) //94  
(1. 318539929 3. 82935405 0. 8) //95

(1. 251507509 3. 85178257 0. 4) //96  
(1. 205155379 3. 709123955 0. 4) //97  
(0. 87729717 3. 80004601 0. 4) //98  
(0. 911039369 3. 94620163 0. 4) //99

(1. 251507509 3. 85178257 0. 8) //100  
(1. 205155379 3. 709123955 0. 8) //101  
(0. 87729717 3. 80004601 0. 8) //102  
(0. 911039369 3. 94620163 0. 8) //103

(0. 842029737 3. 96150046 0. 4) //104  
(0. 81084345 3. 814778224 0. 4) //105  
(0. 475277326 3. 870931601 0. 4) //106  
(0. 493557224 4. 01981359 0. 4) //107

(0. 842029737 3. 96150046 0. 8) //108  
(0. 81084345 3. 814778224 0. 8) //109  
(0. 475277326 3. 870931601 0. 8) //110  
(0. 493557224 4. 01981359 0. 8) //111

(0. 423326468 4. 02781513 0. 4) //112

(0.40764771 3.87863679 0.4) //113  
(0.068050221 3.899406258 0.4) //114  
(0.070667537 4.04938342 0.4) //115

(0.423326468 4.02781513 0.8) //116  
(0.40764771 3.87863679 0.8) //117  
(0.068050221 3.899406258 0.8) //118  
(0.070667537 4.04938342 0.8) //119

(0 4.05 0.4) //120  
(0 3.9 0.4) //121  
(-0.339922461 3.885158005 0.4) //122  
(-0.352996401 4.03458716 0.4) //123

(0 4.05 0.8) //124  
(0 3.9 0.8) //125  
(-0.339922461 3.885158005 0.8) //126  
(-0.352996401 4.03458716 0.8) //127

(-0.423356058 4.02781202 0.4) //128  
(-0.407661957 3.878635292 0.4) //129  
(-0.744156801 3.828345681 0.4) //130  
(-0.772792819 3.97558691 0.4) //131

(-0.423356058 4.02781202 0.8) //132  
(-0.407661957 3.878635292 0.8) //133  
(-0.744156801 3.828345681 0.8) //134  
(-0.772792819 3.97558691 0.8) //135

(-0.842058839 3.96149428 0.4) //136  
(-0.810857463 3.814775246 0.4) //137  
(-1.140252236 3.729587757 0.4) //138

(-1.184122318 3.87302909 0.4) //139

(-0.842058839 3.96149428 0.8) //140

(-0.810857463 3.814775246 0.8) //141

(-1.140252236 3.729587757 0.8) //142

(-1.184122318 3.87302909 0.8) //143

(-1.251535805 3.85177337 0.4) //144

(-1.205169003 3.709119528 0.4) //145

(-1.523854771 3.589967498 0.4) //146

(-1.582478264 3.72803736 0.4) //147

(-1.251535805 3.85177337 0.8) //148

(-1.205169003 3.709119528 0.8) //149

(-1.523854771 3.589967498 0.8) //150

(-1.582478264 3.72803736 0.8) //151

(-1.647300619 3.69985144 0.4) //152

(-1.586276398 3.562825731 0.4) //153

(-1.890761556 3.41101462 0.4) //154

(-1.963496166 3.54220028 0.4) //155

(-1.647300619 3.69985144 0.8) //156

(-1.586276398 3.562825731 0.8) //157

(-1.890761556 3.41101462 0.8) //158

(-1.963496166 3.54220028 0.8) //159

(-2.025017178 3.50739297 0.4) //160

(-1.950004135 3.377496687 0.4) //161

(-2.236952665 3.194689777 0.4) //162

(-2.323001492 3.31755393 0.4) //163

(-2. 025017178 3. 50739297 0. 8) //164  
(-1. 950004135 3. 377496687 0. 8) //165  
(-2. 236952665 3. 194689777 0. 8) //166  
(-2. 323001492 3. 31755393 0. 8) //167

(-2. 380547121 3. 27650659 0. 4) //168  
(-2. 29236712 3. 15516291 0. 4) //169  
(-2. 558635138 2. 943363081 0. 4) //170  
(-2. 65705541 3. 05655959 0. 4) //171

(-2. 380547121 3. 27650659 0. 8) //172  
(-2. 29236712 3. 15516291 0. 8) //173  
(-2. 558635138 2. 943363081 0. 8) //174  
(-2. 65705541 3. 05655959 0. 8) //175

(-2. 70999517 3. 00972194 0. 4) //176  
(-2. 609614333 2. 898260346 0. 4) //177  
(-2. 852284538 2. 659788133 0. 4) //178  
(-2. 961997936 2. 76207680 0. 4) //179

(-2. 70999517 3. 00972194 0. 8) //180  
(-2. 609614333 2. 898260346 0. 8) //181  
(-2. 852284538 2. 659788133 0. 8) //182  
(-2. 961997936 2. 76207680 0. 8) //183

(-3. 009751806 2. 70996200 0. 4) //184  
(-2. 898269932 2. 609603687 0. 4) //185  
(-3. 114683566 2. 347071853 0. 4) //186  
(-3. 234488041 2. 43433197 0. 4) //187

(-3. 009751806 2. 70996200 0. 8) //188  
(-2. 898269932 2. 609603687 0. 8) //189

(−3. 114683566 2. 347071853 0. 8) //190

(−3. 234488041 2. 43433197 0. 8) //191

(−3. 276532818 2. 38051102 0. 4) //192

(−3. 15517133 2. 292365553 0. 4) //193

(−3. 34295731 2. 008640442 0. 4) //194

(−3. 471540253 2. 08588309 0. 4) //195

(−3. 276532818 2. 38051102 0. 8) //196

(−3. 15517133 2. 292365553 0. 8) //197

(−3. 34295731 2. 008640442 0. 8) //198

(−3. 471540253 2. 08588309 0. 8) //199

(−3. 507415282 2. 02497853 0. 4) //200

(−3. 37750385 1. 949991729 0. 4) //201

(−3. 534604742 1. 648201844 0. 4) //202

(−3. 670557365 1. 71158074 0. 4) //203

(−3. 507415282 2. 02497853 0. 8) //204

(−3. 37750385 1. 949991729 0. 8) //205

(−3. 534604742 1. 648201844 0. 8) //206

(−3. 670557365 1. 71158074 0. 8) //207

(−3. 699869591 1. 64725985 0. 4) //208

(−3. 562831558 1. 586263311 0. 4) //209

(−3. 687526124 1. 269705117 0. 4) //210

(−3. 829358895 1. 31852586 0. 4) //211

(−3. 699869591 1. 64725985 0. 8) //212

(−3. 562831558 1. 586263311 0. 8) //213

(−3. 687526124 1. 269705117 0. 8) //214

(−3. 829358895 1. 31852586 0. 8) //215

(-3. 851787166 1. 25149336 0. 4) //216  
(-3. 709123955 1. 205155379 0. 4) //217  
(-3. 80004601 0. 87729717 0. 4) //218  
(-3. 946204972 0. 91102487 0. 4) //219

(-3. 851787166 1. 25149336 0. 8) //220  
(-3. 709123955 1. 205155379 0. 8) //221  
(-3. 80004601 0. 87729717 0. 8) //222  
(-3. 946204972 0. 91102487 0. 8) //223

(-3. 961503556 0. 84201519 0. 4) //224  
(-3. 814778224 0. 81084345 0. 4) //225  
(-3. 870931601 0. 475277326 0. 4) //226  
(-4. 019815399 0. 49354246 0. 4) //227

(-3. 961503556 0. 84201519 0. 8) //228  
(-3. 814778224 0. 81084345 0. 8) //229  
(-3. 870931601 0. 475277326 0. 8) //230  
(-4. 019815399 0. 49354246 0. 8) //231

(-4. 027816683 0. 42331167 0. 4) //232  
(-3. 87863679 0. 40764771 0. 4) //233  
(-3. 899406258 0. 068050221 0. 4) //234  
(-4. 049383682 0. 07065266 0. 4) //235

(-4. 027816683 0. 42331167 0. 8) //236  
(-3. 87863679 0. 40764771 0. 8) //237  
(-3. 899406258 0. 068050221 0. 8) //238  
(-4. 049383682 0. 07065266 0. 8) //239

(-4. 05 0. 00002975 0. 4) //240

(-3.9 0 0.4) //241

(-3.885158005 - 0.339922461 0.4) //242

(-4.034585862 - 0.35301122 0.4) //243

(-4.05 0.00002975 0.8) //244

(-3.9 0 0.8) //245

(-3.885158005 - 0.339922461 0.8) //246

(-4.034585862 - 0.35301122 0.8) //247

(-4.027810462 - 0.42337085 0.4) //248

(-3.878635292 - 0.407661957 0.4) //249

(-3.828345681 - 0.744156801 0.4) //250

(-3.975584069 - 0.77280742 0.4) //251

(-4.027810462 - 0.42337085 0.8) //252

(-3.878635292 - 0.407661957 0.8) //253

(-3.828345681 - 0.744156801 0.8) //254

(-3.975584069 - 0.77280742 0.8) //255

(-3.961491184 - 0.84207339 0.4) //256

(-3.814775246 - 0.810857463 0.4) //257

(-3.729587757 - 1.140252236 0.4) //258

(-3.873024741 - 1.18413654 0.4) //259

(-3.961491184 - 0.84207339 0.8) //260

(-3.814775246 - 0.810857463 0.8) //261

(-3.729587757 - 1.140252236 0.8) //262

(-3.873024741 - 1.18413654 0.8) //263

(-3.851768777 - 1.25154995 0.4) //264

(-3.709119528 - 1.205169003 0.4) //265

(-3.589967498 - 1.523854771 0.4) //266

(-3.728031545 - 1.58249196 0.4) //267

(-3.851768777 - 1.25154995 0.8) //268

(-3.709119528 - 1.205169003 0.8) //269

(-3.589967498 - 1.523854771 0.8) //270

(-3.728031545 - 1.58249196 0.8) //271

(-3.699845388 - 1.64731421 0.4) //272

(-3.562825731 - 1.586276398 0.4) //273

(-3.41101462 - 1.890761556 0.4) //274

(-3.542193065 - 1.96350918 0.4) //275

(-3.699845388 - 1.64731421 0.8) //276

(-3.562825731 - 1.586276398 0.8) //277

(-3.41101462 - 1.890761556 0.8) //278

(-3.542193065 - 1.96350918 0.8) //279

(-3.507385529 - 2.02503006 0.4) //280

(-3.377496687 - 1.950004135 0.4) //281

(-3.194689777 - 2.236952665 0.4) //282

(-3.317545395 - 2.32301368 0.4) //283

(-3.507385529 - 2.02503006 0.8) //284

(-3.377496687 - 1.950004135 0.8) //285

(-3.194689777 - 2.236952665 0.8) //286

(-3.317545395 - 2.32301368 0.8) //287

(-3.276497841 - 2.38055916 0.4) //288

(-3.15516291 - 2.29236712 0.4) //289

(-2.943363081 - 2.558635138 0.4) //290

(-3.056549834 - 2.65706664 0.4) //291

(-3.276497841 - 2.38055916 0.8) //292

(-3.15516291 - 2.29236712 0.8) //293  
(-2.943363081 - 2.558635138 0.8) //294  
(-3.056549834 - 2.65706664 0.8) //295

(-3.009711989 - 2.71000623 0.4) //296  
(-2.898260346 - 2.609614333 0.4) //297  
(-2.659788133 - 2.852284538 0.4) //298  
(-2.762065916 - 2.96200808 0.4) //299

(-3.009711989 - 2.71000623 0.8) //300  
(-2.898260346 - 2.609614333 0.8) //301  
(-2.659788133 - 2.852284538 0.8) //302  
(-2.762065916 - 2.96200808 0.8) //303

(-2.709950949 - 3.00976176 0.4) //304  
(-2.609603687 - 2.898269932 0.4) //305  
(-2.347071853 - 3.114683566 0.4) //306  
(-2.437320085 - 3.23449699 0.4) //307

(-2.709950949 - 3.00976176 0.8) //308  
(-2.609603687 - 2.898269932 0.8) //309  
(-2.347071853 - 3.114683566 0.8) //310  
(-2.437320085 - 3.23449699 0.8) //311

(-2.38049898 - 3.27654156 0.4) //312  
(-2.292365553 - 3.15517133 0.4) //313  
(-2.008640442 - 3.34295731 0.4) //314  
(-2.085870341 - 3.47154791 0.4) //315

(-2.38049898 - 3.27654156 0.8) //316  
(-2.292365553 - 3.15517133 0.8) //317  
(-2.008640442 - 3.34295731 0.8) //318

(-2.085870341 - 3.47154791 0.8) //319

(-2.024965644 - 3.50742272 0.4) //320

(-1.949991729 - 3.37750385 0.4) //321

(-1.648201844 - 3.534604742 0.4) //322

(-1.711567257 - 3.67056365 0.4) //323

(-2.024965644 - 3.50742272 0.8) //324

(-1.949991729 - 3.37750385 0.8) //325

(-1.648201844 - 3.534604742 0.8) //326

(-1.711567257 - 3.67056365 0.8) //327

(-1.647246257 - 3.69987564 0.4) //238

(-1.586263311 - 3.562831558 0.4) //329

(-1.269705117 - 3.687526124 0.4) //330

(-1.318511797 - 3.82936374 0.4) //331

(-1.647246257 - 3.69987564 0.8) //332

(-1.586263311 - 3.562831558 0.8) //333

(-1.269705117 - 3.687526124 0.8) //334

(-1.318511797 - 3.82936374 0.8) //335

(-1.251479212 - 3.85179176 0.4) //336

(-1.205155379 - 3.709123955 0.4) //337

(-0.87729717 - 3.80004601 0.4) //338

(-0.911010378 - 3.94620832 0.4) //339

(-1.251479212 - 3.85179176 0.8) //340

(-1.205155379 - 3.709123955 0.8) //341

(-0.87729717 - 3.80004601 0.8) //342

(-0.911010378 - 3.94620832 0.8) //343

(-0.842000634 - 3.96150665 0.4) //344  
(-0.81084345 - 3.814778224 0.4) //345  
(-0.475277326 - 3.870931601 0.4) //346  
(-0.493527692 - 4.01981721 0.4) //347

(-0.842000634 - 3.96150665 0.8) //348  
(-0.81084345 - 3.814778224 0.8) //349  
(-0.475277326 - 3.870931601 0.8) //350  
(-0.493527692 - 4.01981721 0.8) //351

(-0.423296878 - 4.02781824 0.4) //352  
(-0.40764771 - 3.87863679 0.4) //353  
(-0.068050221 - 3.899406258 0.4) //354  
(-0.070637789 - 4.04938394 0.4) //355

(-0.423296878 - 4.02781824 0.8) //356  
(-0.40764771 - 3.87863679 0.8) //357  
(-0.068050221 - 3.899406258 0.8) //358  
(-0.070637789 - 4.04938394 0.8) //359

(0 - 4.05 0.4) //360  
(-0 - 3.9 0.4) //361  
(0.339922461 - 3.885158005 0.4) //362  
(0.353026041 - 4.03458457 0.4) //363

(0 - 4.05 0.8) //364  
(-0 - 3.9 0.8) //365  
(0.339922461 - 3.885158005 0.8) //366  
(0.353026041 - 4.03458457 0.8) //367

(0.423385647 - 4.02780891 0.4) //368  
(0.407661957 - 3.878635292 0.4) //369

(0.744156801 – 3.828345681 0.4) //370

(0.772822026 – 3.97558123 0.4) //371

(0.423385647 – 4.02780891 0.8) //372

(0.407661957 – 3.878635292 0.8) //373

(0.744156801 – 3.828345681 0.8) //374

(0.772822026 – 3.97558123 0.8) //375

(0.842087942 – 3.96148809 0.4) //376

(0.810857463 – 3.814775246 0.4) //377

(1.140252236 – 3.729587757 0.4) //378

(1.184150771 – 3.87302039 0.4) //379

(0.842087942 – 3.96148809 0.8) //380

(0.810857463 – 3.814775246 0.8) //381

(1.140252236 – 3.729587757 0.8) //382

(1.184150771 – 3.87302039 0.8) //383

(1.251564102 – 3.85176418 0.4) //384

(1.205169003 – 3.709119528 0.4) //385

(1.523854771 – 3.589967498 0.4) //386

(1.582505651 – 3.72802573 0.4) //387

(1.251564102 – 3.85176418 0.8) //388

(1.205169003 – 3.709119528 0.8) //389

(1.523854771 – 3.589967498 0.8) //390

(1.582505651 – 3.72802573 0.8) //391

(1.647327799 – 3.69983934 0.4) //392

(1.586276398 – 3.562825731 0.4) //393

(1.8907615560 – 3.41101462 0.4) //394

(1.963522188 – 3.54218585 0.4) //395

(1. 647327799 – 3. 69983934 0. 8) //396  
(1. 586276398 – 3. 562825731 0. 8) //397  
(1. 8907615560 – 3. 41101462 0. 8) //398  
(1. 963522188 – 3. 54218585 0. 8) //399

(2. 025042945 – 3. 50737809 0. 4) //400  
(1. 950004135 – 3. 377496687 0. 4) //401  
(2. 236952665 – 3. 194689777 0. 4) //402  
(2. 323025864 – 3. 31753686 0. 4) //403

(2. 025042945 – 3. 50737809 0. 8) //404  
(1. 950004135 – 3. 377496687 0. 8) //405  
(2. 236952665 – 3. 194689777 0. 8) //406  
(2. 323025864 – 3. 31753686 0. 8) //407

(2. 380571192 – 3. 27648910 0. 4) //408  
(2. 29236712 – 3. 15516291 0. 4) //409  
(2. 558635138 – 2. 943363081 0. 4) //410  
(2. 657077864 – 3. 05654007 0. 4) //411

(2. 380571192 – 3. 27648910 0. 8) //412  
(2. 29236712 – 3. 15516291 0. 8) //413  
(2. 558635138 – 2. 943363081 0. 8) //414  
(2. 657077864 – 3. 05654007 0. 8) //415

(2. 710017281 – 3. 00970203 0. 4) //416  
(2. 6096143330 – 2. 898260346 0. 4) //417  
(2. 852284538 – 2. 659788133 0. 4) //418  
(2. 962018227 – 2. 76205504 0. 4) //419

(2. 710017281 – 3. 00970203 0. 8) //420

(2.6096143330 – 2.898260346 0.8) //421

(2.852284538 – 2.659788133 0.8) //422

(2.962018227 – 2.76205504 0.8) //423

(3.009771715 – 2.70993989 0.4) //424

(2.898269932 – 2.609603687 0.4) //425

(3.114683566 – 2.347071853 0.4) //426

(3.234505946 – 2.43730820 0.4) //247

(3.009771715 – 2.70993989 0.8) //428

(2.898269932 – 2.609603687 0.8) //429

(3.114683566 – 2.347071853 0.8) //430

(3.234505946 – 2.43730820 0.8) //431

(3.276550306 – 2.38048694 0.4) //432

(3.15517133 – 2.292365553 0.4) //433

(3.34295731 – 2.008640442 0.4) //434

(3.471555576 – 2.08585759 0.4) //435

(3.276550306 – 2.38048694 0.8) //436

(3.15517133 – 2.292365553 0.8) //437

(3.34295731 – 2.008640442 0.8) //438

(3.471555576 – 2.08585759 0.8) //439

(3.507430159 – 2.02495276 0.4) //440

(3.37750385 – 1.949991729 0.4) //441

(3.534604742 – 1.648201844 0.4) //442

(3.670569939 – 1.71155377 0.4) //443

(3.507430159 – 2.02495276 0.8) //444

(3.37750385 – 1.949991729 0.8) //445

(3.534604742 – 1.648201844 0.8) //446

(3.670569939 – 1.71155377 0.8) //447

(3.699881693 – 1.64723267 0.4) //448

(3.562831558 – 1.586263311 0.4) //449

(3.687526124 – 1.269705117 0.4) //450

(3.829368582 – 1.31849773 0.4) //451

(3.699881693 – 1.64723267 0.8) //452

(3.562831558 – 1.586263311 0.8) //453

(3.687526124 – 1.269705117 0.8) //454

(3.829368582 – 1.31849773 0.8) //455

(3.85179636 – 1.25146506 0.4) //456

(3.709123955 – 1.205155379 0.4) //457

(3.80004601 – 0.87729717 0.4) //458

(3.946211665 – 0.91099588 0.4) //459

(3.85179636 – 1.25146506 0.8) //460

(3.709123955 – 1.205155379 0.8) //461

(3.80004601 – 0.87729717 0.8) //462

(3.946211665 – 0.91099588 0.8) //463

(3.961509742 – 0.84198608 0.4) //464

(3.814778224 – 0.81084345 0.4) //465

(3.870931601 – 0.475277326 0.4) //466

(4.019819025 – 0.49351293 0.4) //467

(3.961509742 – 0.84198608 0.8) //468

(3.814778224 – 0.81084345 0.8) //469

(3.870931601 – 0.475277326 0.8) //470

(4.019819025 – 0.49351293 0.8) //471

(4.027819792 - 0.42328208 0.4) //472  
 (3.87863679 - 0.40764771 0.4) //473  
 (3.899406258 - 0.068050221 0.4) //474  
 (4.049384201 - 0.07062291 0.4) //475

(4.027819792 - 0.42328208 0.8) //476  
 (3.87863679 - 0.40764771 0.8) //477  
 (3.899406258 - 0.068050221 0.8) //478  
 (4.049384201 - 0.07062291 0.8) //479

);

*blocks*

(  
*hex* (1 0 3 2 5 4 7 6) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//1  
*hex* (9 8 11 10 13 12 15 14) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//2  
*hex* (17 16 19 18 21 20 23 22) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//3  
*hex* (25 24 27 26 29 28 31 30) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//4  
*hex* (33 32 35 34 37 36 39 38) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//5  
*hex* (41 40 43 42 45 44 47 46) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//6  
*hex* (49 48 51 50 53 52 55 54) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//7  
*hex* (57 56 59 58 61 60 63 62) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//8  
*hex* (65 64 67 66 69 68 71 70) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//9  
*hex* (73 72 75 74 77 76 79 78) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//10  
*hex* (81 80 83 82 85 84 87 86) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//11  
*hex* (89 88 91 90 93 92 95 94) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//12  
*hex* (97 96 99 98 101 100 103 102) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//13  
*hex* (105 104 107 106 109 108 111 110) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//14  
*hex* (113 112 115 114 117 116 119 118) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//15  
  
*hex* (121 120 123 122 125 124 127 126) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//16  
*hex* (129 128 131 130 133 132 135 134) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//17

*hex* (137 136 139 138 141 140 143 142) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//18  
*hex* (145 144 147 146 149 148 151 150) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//19  
*hex* (153 152 155 154 157 156 159 158) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//20  
*hex* (161 160 163 162 165 164 167 166) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//21  
*hex* (169 168 171 170 173 172 175 174) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//22  
*hex* (177 176 179 178 181 180 183 182) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//23  
*hex* (185 184 187 186 189 188 191 190) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//24  
*hex* (193 192 195 194 197 196 199 198) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//25  
*hex* (201 200 203 202 205 204 207 206) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//26  
*hex* (209 208 211 210 213 212 215 214) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//27  
*hex* (217 216 219 218 221 220 223 222) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//28  
*hex* (225 224 227 226 229 228 231 230) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//29  
*hex* (233 232 235 234 237 236 239 238) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//30

*hex* (241 240 243 242 245 244 247 246) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//31  
*hex* (249 248 251 250 253 252 255 254) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//32  
*hex* (257 256 259 258 261 260 263 262) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//33  
*hex* (265 264 267 266 269 268 271 270) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//34  
*hex* (273 272 275 274 277 276 279 278) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//35  
*hex* (281 280 283 282 285 284 287 286) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//36  
*hex* (289 288 291 290 293 292 295 294) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//37  
*hex* (297 296 299 298 301 300 303 302) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//38  
*hex* (305 304 307 306 309 308 311 310) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//39  
*hex* (313 312 315 314 317 316 319 318) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//40  
*hex* (321 320 323 322 325 324 327 326) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//41  
*hex* (329 328 331 330 333 332 335 334) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//42  
*hex* (337 336 339 338 341 340 343 342) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//43  
*hex* (345 344 347 346 349 348 351 350) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//44  
*hex* (353 352 355 354 357 356 359 358) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//45

*hex* (361 360 363 362 365 364 367 366) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//46  
*hex* (369 368 371 370 373 372 375 374) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//47

*hex* (377 376 379 378 381 380 383 382) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//48  
*hex* (385 384 387 386 389 388 391 390) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//49  
*hex* (393 392 395 394 397 396 399 398) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//50  
*hex* (401 400 403 402 405 404 407 406) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//51  
*hex* (409 408 411 410 413 412 415 414) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//52  
*hex* (417 416 419 418 421 420 423 422) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//53  
*hex* (425 424 427 426 429 428 431 430) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//54  
*hex* (433 432 435 434 437 436 439 438) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//55  
*hex* (441 440 443 442 445 444 447 446) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//56  
*hex* (449 448 451 450 453 452 455 454) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//57  
*hex* (457 456 459 458 461 460 463 462) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//58  
*hex* (465 464 467 466 469 468 471 470) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//59  
*hex* (473 472 475 474 477 476 479 478) (3 9 9) *simpleGrading* (1 1 1)//60

);

*edges*

(  
*arc* 4 7 (4. 04614529741 0. 17665851883 0. 8)  
*arc* 5 6 (3. 8962880468 0. 170116008 0. 8)  
*arc* 0 3 (4. 04614529741 0. 17665851883 0. 4)  
*arc* 1 2 (3. 8962880468 0. 170116008 0. 4)  
*arc* 8 11 (4. 0055140389 0. 598629505 0. 4)  
*arc* 12 15 (4. 0055140389 0. 598629505 0. 8)  
*arc* 9 10 (3. 8571616671 0. 576458042 0. 4)  
*arc* 13 14 (3. 8571616671 0. 576458042 0. 8)  
  
*arc* 16 19 (3. 9209973434 1. 014041337 0. 4)  
*arc* 20 23 (3. 9209973434 1. 014041337 0. 8)  
*arc* 17 18 (3. 7757752196 0. 97648425 0. 4)  
*arc* 21 22 (3. 7757752196 0. 97648425 0. 8)  
*arc* 24 27 (3. 7935211798 1. 418343068 0. 4)

*arc* 28 31 (3. 7935211798 1. 418343068 0. 8)

*arc* 25 26 (3. 6530203953 1. 365811843 0. 4)

*arc* 29 30 (3. 6530203953 1. 365811843 0. 8)

*arc* 32 35 (3. 6244822100 1. 807105063 0. 4)

*arc* 36 39 (3. 6244822100 1. 807105063 0. 8)

*arc* 33 34 (3. 4902421282 1. 740175246 0. 4)

*arc* 37 38 (3. 4902421282 1. 740175246 0. 8)

*arc* 40 43 (3. 4157324691 2. 176067945 0. 4)

*arc* 44 47 (3. 4157324691 2. 176067945 0. 8)

*arc* 41 42 (3. 2892238592 2. 095472835 0. 4)

*arc* 45 46 (3. 2892238592 2. 095472835 0. 8)

*arc* 48 51 (3. 1695590737 2. 521189259 0. 4)

*arc* 52 55 (3. 1695590737 2. 521189259 0. 8)

*arc* 49 50 (3. 0521679969 2. 427811879 0. 4)

*arc* 53 54 (3. 0521679969 2. 427811879 0. 8)

*arc* 56 59 (2. 8886591635 2. 838687767 0. 4)

*arc* 60 63 (2. 8886591635 2. 838687767 0. 8)

*arc* 57 58 (2. 7816717870 2. 733551183 0. 4)

*arc* 61 62 (2. 7816717870 2. 733551183 0. 8)

*arc* 64 67 (2. 5761103511 3. 125084872 0. 4)

*arc* 68 71 (2. 5761103511 3. 125084872 0. 8)

*arc* 65 66 (2. 4806988566 3. 009340988 0. 4)

*arc* 69 70 (2. 4806988566 3. 009340988 0. 8)

*arc* 72 75 (2. 2353370027 3. 377242734 0. 4)

*arc* 76 79 (2. 2353370027 3. 377242734 0. 8)

*arc* 73 74 (2. 1525467434 3. 25215967 0. 4)

*arc* 77 78 (2. 1525467434 3. 25215967 0. 8)

*arc* 80 83 (1. 8700727200 3. 592398645 0. 4)

*arc* 84 87 (1. 8700727200 3. 592398645 0. 8)

*arc* 81 82 (1. 8008107674 3. 459346843 0. 4)

*arc* 85 86 (1. 8008107674 3. 459346843 0. 8)

*arc* 88 91 (1. 4843194334 3. 768195300 0. 4)

*arc* 92 95 (1. 4843194334 3. 768195300 0. 8)

*arc* 89 90 (1. 4293446396 3. 628632511 0. 4)

*arc* 93 94 (1. 4293446396 3. 628632511 0. 8)

*arc* 96 99 (1. 0823035566 3. 902706626 0. 4)

*arc* 100 103 (1. 0823035566 3. 902706626 0. 8)

*arc* 97 98 (1. 0422182397 3. 758161936 0. 4)

*arc* 101 102 (1. 0422182397 3. 758161936 0. 8)

*arc* 104 107 (0. 6684296800 3. 994458882 0. 4)

*arc* 108 111 (0. 6684296800 3. 994458882 0. 8)

*arc* 105 106 (0. 6436730252 3. 846515961 0. 4)

*arc* 109 110 (0. 6436730252 3. 846515961 0. 8)

*arc* 112 115 (0. 2472323138 4. 042446806 0. 4)

*arc* 116 119 (0. 2472323138 4. 042446806 0. 8)

*arc* 113 114 (0. 2380755615 3. 892726554 0. 4)

*arc* 117 118 (0. 2380755615 3. 892726554 0. 8)

*arc* 120 123 (−0. 1766737940 4. 046144630 0. 4)

*arc* 124 127 (−0. 1766737940 4. 046144630 0. 8)

*arc* 121 122 (−0. 1701303201 3. 896287422 0. 4)

*arc* 125 126 (−0. 1701303201 3. 896287422 0. 8)

*arc* 128 131 (−0. 5986442177 4. 005511840 0. 4)

*arc* 132 135 (−0. 5986442177 4. 005511840 0. 8)

*arc* 129 130 (−0. 5764722097 3. 85715955 0. 4)

*arc* 133 134 (−0. 5764722097 3. 85715955 0. 8)

*arc* 136 139 (−1. 0140557395 3. 920993619 0. 4)

*arc* 140 143 (−1. 0140557395 3. 920993619 0. 8)

*arc* 137 138 (−0.9764981195 3.775771633 0.4)

*arc* 141 142 (−0.9764981195 3.775771633 0.8)

*arc* 144 147 (−1.4183570024 3.793515970 0.4)

*arc* 148 151 (−1.4183570024 3.793515970 0.8)

*arc* 145 146 (−1.3658252616 3.653015378 0.4)

*arc* 149 150 (−1.3658252616 3.653015378 0.8)

*arc* 152 155 (−1.8071183766 3.624475572 0.4)

*arc* 156 159 (−1.8071183766 3.624475572 0.8)

*arc* 153 154 (−1.7401880664 3.490235736 0.4)

*arc* 157 158 (−1.7401880664 3.490235736 0.8)

*arc* 160 163 (−2.1760804912 3.415724476 0.4)

*arc* 164 167 (−2.1760804912 3.415724476 0.8)

*arc* 161 162 (−2.0954849175 3.289216162 0.4)

*arc* 165 166 (−2.0954849175 3.289216162 0.8)

*arc* 168 171 (−2.5212009012 3.169549813 0.4)

*arc* 172 175 (−2.5212009012 3.169549813 0.8)

*arc* 169 170 (−2.42782309 3.052159079 0.4)

*arc* 173 174 (−2.42782309 3.052159079 0.8)

*arc* 176 179 (−2.8386983774 2.888648736 0.4)

*arc* 180 183 (−2.8386983774 2.888648736 0.8)

*arc* 177 178 (−2.7335614005 2.781661746 0.4)

*arc* 181 182 (−2.7335614005 2.781661746 0.8)

*arc* 184 187 (−3.1250943348 2.576098872 0.4)

*arc* 188 191 (−3.1250943348 2.576098872 0.8)

*arc* 185 186 (−3.0093501002 2.480687803 0.4)

*arc* 189 190 (−3.0093501002 2.480687803 0.8)

*arc* 192 195 (−3.3772509448 2.235324597 0.4)

*arc* 196 199 (−3.3772509448 2.235324597 0.8)

*arc* 193 194 (−3.2521675765 2.152534798 0.4)

*arc* 197 198 (−3.2521675765 2.152534798 0.8)

*arc* 200 203 (−3.5924055138 1.870059524 0.4)

*arc* 204 207 (−3.5924055138 1.870059524 0.8)

*arc* 201 202 (−3.4593534577 1.800798060 0.4)

*arc* 205 206 (−3.4593534577 1.800798060 0.8)

*arc* 208 211 (−3.7682007523 1.484305592 0.4)

*arc* 212 215 (−3.7682007523 1.484305592 0.8)

*arc* 209 210 (−3.6286377614 1.429331311 0.4)

*arc* 213 214 (−3.6286377614 1.429331311 0.8)

*arc* 216 219 (−3.9027106019 1.082289221 0.4)

*arc* 220 223 (−3.9027106019 1.082289221 0.8)

*arc* 217 218 (−3.7581657648 1.042204435 0.4)

*arc* 221 222 (−3.7581657648 1.042204435 0.8)

*arc* 224 227 (−3.9944613376 0.668415008 0.4)

*arc* 228 231 (−3.9944613376 0.668415008 0.8)

*arc* 225 226 (−3.8465183251 0.643658896 0.4)

*arc* 229 230 (−3.8465183251 0.643658896 0.8)

*arc* 232 235 (−4.0424477146 0.247217465 0.4)

*arc* 236 239 (−4.0424477146 0.247217465 0.8)

*arc* 233 234 (−3.8927274288 0.238061263 0.4)

*arc* 237 238 (−3.8927274288 0.238061263 0.8)

*arc* 240 243 (−4.0461439815 − 0.176688656 0.4)

*arc* 244 247 (−4.0461439815 − 0.176688656 0.8)

*arc* 241 242 (−3.896286797 − 0.170144632 0.4)

*arc* 245 246 (−3.896286797 − 0.170144632 0.8)

*arc* 248 251 (−4.0055096411 − 0.598658931 0.4)

*arc* 252 255 (−4.0055096411 − 0.598658931 0.8)

*arc* 249 250 (−3.8571574321 − 0.576486378 0.4)

*arc* 253 254 (−3.8571574321 − 0.576486378 0.8)

*arc* 256 259 (−3.9209898938 − 1.014070142 0.4)

*arc* 260 263 (−3.9209898938 − 1.014070142 0.8)

*arc* 257 258 (−3.7757680458 − 0.976511989 0.4)

*arc* 261 262 (−3.7757680458 − 0.976511989 0.8)

*arc* 264 267 (−3.7935107599 − 1.418370937 0.4)

*arc* 268 271 (−3.7935107599 − 1.418370937 0.8)

*arc* 265 266 (−3.6530103614 − 1.36583868 0.4)

*arc* 269 270 (−3.6530103614 − 1.36583868 0.8)

*arc* 272 275 (−3.6244689342 − 1.807131690 0.4)

*arc* 276 279 (−3.6244689342 − 1.807131690 0.8)

*arc* 273 274 (−3.490229344 − 1.740200887 0.4)

*arc* 277 278 (−3.490229344 − 1.740200887 0.8)

*arc* 280 283 (−3.4157164828 − 2.176093038 0.4)

*arc* 284 287 (−3.4157164828 − 2.176093038 0.8)

*arc* 281 282 (−3.2892084649 − 2.095496999 0.4)

*arc* 285 286 (−3.2892084649 − 2.095496999 0.8)

*arc* 288 291 (−3.1695405519 − 2.521212544 0.4)

*arc* 292 295 (−3.1695405519 − 2.521212544 0.8)

*arc* 289 290 (−3.0521501611 − 2.427834301 0.4)

*arc* 293 294 (−3.0521501611 − 2.427834301 0.8)

*arc* 296 299 (−2.8886383092 − 2.838708988 0.4)

*arc* 300 303 (−2.8886383092 − 2.838708988 0.8)

*arc* 297 298 (−2.7816517052 − 2.733571618 0.4)

*arc* 301 302 (−2.7816517052 − 2.733571618 0.8)

*arc* 304 307 (−2.5760873929 − 3.125103797 0.4)

*arc* 308 311 (−2.5760873929 − 3.125103797 0.8)

*arc* 305 306 (−2.4806767487 − 3.009359212 0.4)

*arc* 309 310 (−2.4806767487 − 3.009359212 0.8)

*arc* 312 315 (−2.2353121921 − 3.377259156 0.4)

*arc* 316 319 (−2.2353121921 − 3.377259156 0.8)

*arc* 313 314 (−2.1525228516 − 3.252175483 0.4)

*arc* 317 318 (−2.1525228516 − 3.252175483 0.8)

*arc* 320 323 (−1.8700463287 − 3.592412383 0.4)

*arc* 324 327 (−1.8700463287 − 3.592412383 0.8)

*arc* 321 322 (−1.8007853536 − 3.459360072 0.4)

*arc* 325 326 (−1.8007853536 − 3.459360072 0.8)

*arc* 328 331 (−1.4842917507 − 3.768206204 0.4)

*arc* 332 335 (−1.4842917507 − 3.768206204 0.8)

*arc* 329 330 (−1.4293179821 − 3.628643012 0.4)

*arc* 333 334 (−1.4293179821 − 3.628643012 0.8)

*arc* 336 339 (−1.0822748856 − 3.902714577 0.4)

*arc* 340 343 (−1.0822748856 − 3.902714577 0.8)

*arc* 337 338 (−1.0421906306 − 3.758169593 0.4)

*arc* 341 342 (−1.0421906306 − 3.758169593 0.8)

*arc* 344 347 (−0.6684003351 − 3.994463793 0.4)

*arc* 348 351 (−0.6684003351 − 3.994463793 0.8)

*arc* 345 346 (−0.6436447671 − 3.846520689 0.4)

*arc* 349 350 (−0.6436447671 − 3.846520689 0.8)

*arc* 352 355 (−0.2472026164 − 4.042448623 0.4)

*arc* 356 359 (−0.2472026164 − 4.042448623 0.8)

*arc* 353 354 (−0.2380469639 − 3.892728303 0.4)

*arc* 357 358 (−0.2380469639 − 3.892728303 0.8)

*arc* 360 363 (0.1767035186 − 4.046143332 0.4)

*arc* 364 367 (0.1767035186 − 4.046143332 0.8)

*arc* 361 362 (0.1701589439 − 3.896286172 0.4)

*arc* 365 366 (0.1701589439 − 3.896286172 0.8)

*arc* 368 371 (0.5986736438 – 4.005507442 0.4)  
*arc* 372 375 (0.5986736438 – 4.005507442 0.8)  
*arc* 369 370 (0.5765005459 – 3.857155315 0.4)  
*arc* 373 374 (0.5765005459 – 3.857155315 0.8)  
*arc* 376 379 (1.0140845447 – 3.920986169 0.4)  
*arc* 380 383 (1.0140845447 – 3.920986169 0.8)  
*arc* 377 378 (0.9765258578 – 3.775764459 0.4)  
*arc* 381 382 (0.9765258578 – 3.775764459 0.8)

*arc* 384 387 (1.4183848711 – 3.793505550 0.4)  
*arc* 388 391 (1.4183848711 – 3.793505550 0.8)  
*arc* 385 386 (1.3658520981 – 3.653005344 0.4)  
*arc* 389 390 (1.3658520981 – 3.653005344 0.8)  
*arc* 392 395 (1.8071450035 – 3.624462296 0.4)  
*arc* 396 399 (1.8071450035 – 3.624462296 0.8)  
*arc* 393 394 (1.7402137070 – 3.490222952 0.4)  
*arc* 397 398 (1.7402137070 – 3.490222952 0.8)

*arc* 400 403 (2.1761055845 – 3.415708489 0.4)  
*arc* 404 407 (2.1761055845 – 3.415708489 0.8)  
*arc* 401 402 (2.0955090814 – 3.289200768 0.4)  
*arc* 405 406 (2.0955090814 – 3.289200768 0.8)  
*arc* 408 411 (2.5212241859 – 3.169531291 0.4)  
*arc* 412 415 (2.5212241859 – 3.169531291 0.8)  
*arc* 409 410 (2.4278455124 – 3.052141243 0.4)  
*arc* 413 414 (2.4278455124 – 3.052141243 0.8)

*arc* 416 419 (2.8387195985 – 2.888627882 0.4)  
*arc* 420 423 (2.8387195985 – 2.888627882 0.8)  
*arc* 417 418 (2.7335818356 – 2.781641664 0.4)  
*arc* 421 422 (2.7335818356 – 2.781641664 0.8)

*arc* 424 427 (3. 1251132598 – 2. 576075914 0. 4)  
*arc* 428 431 (3. 1251132598 – 2. 576075914 0. 8)  
*arc* 425 426 (3. 0093683243 – 2. 480665695 0. 4)  
*arc* 429 430 (3. 0093683243 – 2. 480665695 0. 8)

*arc* 432 435 (3. 3772673663 – 2. 235299787 0. 4)  
*arc* 436 439 (3. 3772673663 – 2. 235299787 0. 8)  
*arc* 433 434 (3. 2521833898 – 2. 152510906 0. 4)  
*arc* 437 438 (3. 2521833898 – 2. 152510906 0. 8)  
*arc* 440 443 (3. 5924192519 – 1. 870033133 0. 4)  
*arc* 444 447 (3. 5924192519 – 1. 870033133 0. 8)  
*arc* 441 442 (3. 459366687 – 1. 800772647 0. 4)  
*arc* 445 446 (3. 459366687 – 1. 800772647 0. 8)

*arc* 448 451 (3. 7682116565 – 1. 484277909 0. 4)  
*arc* 452 455 (3. 7682116565 – 1. 484277909 0. 8)  
*arc* 449 450 (3. 6286482618 – 1. 429304653 0. 4)  
*arc* 453 454 (3. 6286482618 – 1. 429304653 0. 8)  
*arc* 456 459 (3. 9027185527 – 1. 082260550 0. 4)  
*arc* 460 463 (3. 9027185527 – 1. 082260550 0. 8)  
*arc* 457 458 (3. 7581734211 – 1. 042176826 0. 4)  
*arc* 461 462 (3. 7581734211 – 1. 042176826 0. 8)

*arc* 464 467 (3. 9944662480 – 0. 668385663 0. 4)  
*arc* 468 471 (3. 9944662480 – 0. 668385663 0. 8)  
*arc* 465 466 (3. 8465230536 – 0. 643630638 0. 4)  
*arc* 469 470 (3. 8465230536 – 0. 643630638 0. 8)  
*arc* 472 475 (4. 0424495306 – 0. 247187768 0. 4)  
*arc* 476 479 (4. 0424495306 – 0. 247187768 0. 8)  
*arc* 473 474 (3. 8927291776 – 0. 238032665 0. 4)  
*arc* 477 478 (3. 8927291776 – 0. 238032665 0. 8)  
);

*boundary*

(

*wal*

{

*type wall;*

*faces*

(

(0 3 4 7)

(8 11 12 15)

(16 19 20 23)

(24 27 28 31)

(32 35 36 39)

(40 43 44 47)

(48 51 52 55)

(56 59 60 63)

(64 67 68 71)

(72 75 76 79)

(80 83 84 87)

(88 91 92 95)

(96 99 100 103)

(104 107 108 111)

(112 115 116 119)

(120 123 124 127)

(128 131 132 135)

(136 139 140 143)

(144 147 148 151)

(152 155 156 159)

(160 163 164 167)

(168 171 172 175)

(176 179 180 183)

(184 187 188 191)

(192 195 196 199)

- (200 203 204 207)
- (208 211 212 215)
- (216 219 220 223)
- (224 227 228 231)
- (232 235 236 239)
- (240 243 244 247)
- (248 251 252 255)
- (256 259 260 263)
- (264 267 268 271)
- (272 275 276 279)
- (280 283 284 287)
- (288 291 292 295)
- (296 299 300 303)
- (304 307 308 311)
- (312 315 316 319)
- (320 323 324 327)
- (328 331 332 335)
- (336 339 340 343)
- (344 347 348 351)
- (352 355 356 359)
- (360 363 364 367)
- (368 371 372 375)
- (376 379 380 383)
- (384 387 388 391)
- (392 395 396 399)
- (400 403 404 407)
- (408 411 412 415)
- (416 419 420 423)
- (424 427 428 431)
- (432 435 436 439)
- (440 443 444 447)
- (448 451 452 455)

---

(456 459 460 463)  
(464 467 468 471)  
(472 475 476 479)  
);  
}  
*wal1*  
{  
*type wall;*  
*faces*  
(  
(1 2 5 6)  
(9 10 13 14)  
(17 18 21 22)  
(25 26 29 30)  
(33 34 37 38)  
(41 42 45 46)  
(49 50 53 54)  
(57 58 61 62)  
(65 66 69 70)  
(73 74 77 78)  
(81 82 85 86)  
(89 90 93 94)  
(97 98 101 102)  
(105 106 109 110)  
(113 114 117 118)  
(121 122 125 126)  
(129 130 133 134)  
(137 138 141 142)  
(145 146 149 150)  
(153 154 157 158)  
(161 162 165 166)  
(169 170 173 174)

(177 178 181 182)  
(185 186 189 190)  
(193 194 197 198)  
(201 202 205 206)  
(209 210 213 214)  
(217 218 221 222)  
(225 226 229 230)  
(233 234 237 238)  
(241 242 245 246)  
(249 250 253 254)  
(257 258 261 262)  
(265 266 269 270)  
(273 274 277 278)  
(281 282 285 286)  
(289 290 293 294)  
(297 298 301 302)  
(305 306 309 310)  
(313 314 317 318)  
(321 322 325 326)  
(329 330 333 334)  
(337 338 341 342)  
(345 346 349 350)  
(353 354 357 358)  
(361 362 365 366)  
(369 370 373 374)  
(377 378 381 382)  
(385 386 389 390)  
(393 394 397 398)  
(401 402 405 406)  
(409 410 413 414)  
(417 418 421 422)  
(425 426 429 430)

```
(433 434 437 438)
(441 442 445 446)
(449 450 453 454)
(457 458 461 462)
(465 466 469 470)
(473 474 477 478)
);
}
);
mergePatchPairs
(
); // *****
***** //
```

---

# Bibliografía

- [1] I. Vera, “Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. parte ii: residuos sólidos urbanos,” *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 16, pp. 471–478, 2015.
- [2] C. Bustamante, “Estado del arte de la bioenergía en México,” *Red temática de bioenergía del Conacyt*, vol.-, pp.-, 2016.
- [3] J. Jaramillo, “Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. parte i: residuos sólidos urbanos,” *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 15, pp. 429–436, 2014.
- [4] A. Paloma, *Hidrógeno y pila de combustible, Year = 2000*. Fundación de energía de la comunidad de Madrid.
- [5] T. Mandal, “Determination of the quality of biogas by flame temperature measurement,” *Energy conversion and management*, vol. 40, pp. 1225–1228, 1999.
- [6] K. Cacia, *Estudio comparativo entre las propiedades de combustión de la mezcla biogas-aire normal y biogás-aire enriquecido con oxígeno*. Ingeniería e investigación, 2001.
- [7] G. Lira, *Análisis de la eficiencia de la combustión de biogás en un quemador boliviano*. Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, 2016.
- [8] J. Li, “Hydrogen combustion as a thermal source,” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 1083–1088, 2017.

- [9] C. Cheung, “Effects of hydrogen concentration on the emission and heat transfer of a premixed lpg-hydrogen flame,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 6097–6105, 2012.
- [10] H. Burbano, “Effects of hydrogen addition to methane on the flame structure and co emissions in atmospheric burners,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 34510–3415, 2008.
- [11] T. Leung, “The effect of hydrogen addition on biogas non-premixed jet flame stability in a co-flowing air stream,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 3856–3862, 2008.
- [12] H. Zhen, “Characterization of biogas-hydrogen premixed flames using bunsen burner,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, pp. 13292–13299, 2014.
- [13] H. Zhen, “Effects of hydrogen addition on the characteristics of a biogas diffusion flame,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, pp. 6874–6881, 2013.
- [14] G. Sorrentino, “An experimental and numerical study of mild combustion in a cyclonic burner,” *Energy Procedia*, vol. 120, pp. 649–656, 2017.
- [15] M. Hamedi, “Biogas upgrading for on-board hydrogen production: Reforming process cfd modelling,” *Internacional Journal of Hydrogen Energy*, vol.-, pp. 12532–12540, 2014.
- [16] T. Myers, “Predicting sprinkler spray dispersion in firefoam,” *Fire Safety Journal*, vol. 100, pp. 93–102, 2018.
- [17] K. Zohra, “Numerical simulation of ch4-h2-air non-premixed flame stabilized by a bluff body,” *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 530–536, 2017.
- [18] S. Callejas, “Los biocombustibles,” *El Cotidiano*, vol.-, pp. 75–82, 2009.
- [19] R. Preston, “Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas,” *Bbc*, vol.-, p. 20, 1987.

- [20] L. Contreras, “Producción de biogás con fines energéticos. de lo histórico a lo estratégico.,” *Revistas Futuros*, vol. 4, p. 8, 2006.
- [21] A. Guevara, *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. Organización Panamericana de la salud, 1996.
- [22] S. de Energía, *NORMA Oficial Mexicana NOM-025-ENER-2013, Eficiencia térmica de aparatos domésticos para cocción de alimentos que usan gas L.P. o gas natural. Límites, métodos de prueba y etiquetado*, 2013.
- [23] R. García, “Combustión y combustibles,” *Teoría de la combustión*, vol.–, pp.–, 2001.
- [24] S. Valero, “Reformado con vapor de agua de furfural utilizando hidrotalcitas de níquel. influencia del método de incorporación del níquel.,” *Energética del Hidrógeno. Contexto, Estado Actual y Perspectivas de Futuro*, vol.–, p. 8, 2012.
- [25] L. Lodra, “El hidrógeno, combustible del futuro,” *V Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica*, vol. 99, pp. 49–67, 2005.
- [26] C. Fernández, “Sistema de energía del hidrógeno,” *In Energética del Hidrógeno. Contexto, Estado Actual y Perspectivas de Futuro*, vol.–, pp. 91–126, 2005.
- [27] J. Quiceno, “Diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis,” *UniTecPereira*, vol.–, pp. –, 2013.
- [28] A. Pino, “Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. caso de la producción de hidrógeno.,” *Ingeniero de organización industrial*, vol.–, pp. –, 2009.
- [29] G. Mata, “Aplicación de la dinámica de fluidos computacional (cfd) y el modelado mecánico en el estudio del sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido (bec),” *Universidad Nacional Autónoma de México*, vol.–, pp.–, 2017.
- [30] G. Rivera, *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. Palibrio, 2015.
- [31] H. Ojeda, “Aplicación del método de los volúmenes finitos al cálculos del parámetro de masa añadida de un cilindro vibrante en el seno de un fluido,”

- Instituto universitario de sistemas inteligentes y aplicaciones numéricas en ingeniería*, vol.–, pp.–, 2015.
- [32] M. Hossain, “Cfd modelling of turbulent non-premixed combustion,” *Loughborough university institutional repository*, vol.–, pp.–, 1999.
- [33] R. Zamorano, *FireFoam (CFD solver) validation in compartment fire scenario using high resolution datas*. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2018.
- [34] J. Oro, *Introducción a la dinámica de fluidos computacional(CFD) por el método de volúmenes finitos*. Reverté, 2012.
- [35] J. Sarrazin, “Mallado de geometrías complejas mediante cfd,” *Universidad politécnica de Catalunya*, vol.–, pp.–, 2016.
- [36] S. Júnior, “Numerical validation of viewfactor and fvdrom radiation models of openfoam and application in the study of food furnces,” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 26, pp. 546–556, 2016.
- [37] D. Miller, *A fine resolution CFD simulation approach for biomass cook stove development*. Colorado State University, 2011.
- [38] M. Varnero, *Manual de biogás*. Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables, 2011.