



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

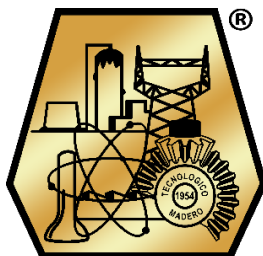


TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

TESIS

EYECTOR TIPO VENTURI COMO ALTERNATIVA AL USO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE BAJA PRESIÓN PARA SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN

Que para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias de la Ingeniería

Presenta

Ing. José Roberto Vázquez Carreón

G13071478

CVU 1324562

Director de Tesis

Dr. Luis Fortino Cisneros Sinencio

CVU 102695

Co-director de Tesis

Dra. Liliana Elizabeth Arvizu Rodríguez

CVU 444517

Cd. Madero, Tamaulipas

Mayo 2026



Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Madero, Tamaulipas, **17/Abril/2026**

Oficio No.: U11.041/26

Asunto: Autorización de Impresión

C. JOSÉ ROBERTO VÁZQUEZ CARREÓN
No. DE CONTROL G13071478
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	DR. LUIS FORTINO CISNEROS SINENCIO
SECRETARIO:	DRA. LILIANA ELIZABETH ARVIZU RODRÍGUEZ
VOCAL 1:	DR. PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
SUPLENTE:	DRA. ANA LIDIA MARTÍNEZ SALAZAR

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

**"EYECTOR TIPO VENTURI COMO ALTERNATIVA AL USO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO
DE BAJA PRESIÓN PARA SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN"**

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Por Mi Patria y Por Mi Bien"®

JOSÉ AARÓN MELO BANDA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Archivo
JAMB/NRV/jar



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle por todo el apoyo incondicional que me brindo en todo el trayecto de mi maestría en especial a mi novia Daniela, siempre mostrándome su comprensión y amor en los momentos donde más lo necesitaba, apoyándome cada día con sus palabras y motivación, agradezco mucho el tiempo que me brindo día con día sin esperar nada a cambio.

Le agradezco a Dios por permitirme realizar este proyecto y por lograr concluir mis estudios de maestría dándome fortaleza para seguir adelante.

A mis padres Mariana y Rolando por la formación que me brindaron en mi vida, los valores que me inculcaron para poder ser alguien exitoso. A mi abuela María Luisa la cual me apoyo en todo mi transcurso estudiantil y formación profesional.

A los maestros y doctores que fueron un gran apoyo durante mis estudios en especial a los doctores Luis Fortino Cisneros Sinencio y Liliana Elizabeth Arvizu Rodríguez, los cuales siempre me apoyaron en todas mis dudas y siempre tuvieron una disponibilidad cuando lo requería. A mis compañeros de la maestría Allan, Stephanie, Alma y Carlos, por su tiempo y compañerismo en el transcurso de la maestría.

Al Instituto Tecnológico de Ciudad Madero que me brindo esta gran oportunidad de poder cursar una maestría, poder seguir aprendiendo y así tener una formación académica de calidad.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por el apoyo económico otorgado a través de la beca y por brindarme una gran oportunidad de estudiar una maestría que me ayudara a conseguir mejores oportunidades de empleo.

Resumen

El avance de la industria ha traído consigo algunos fenómenos indeseados como la contaminación. Por lo anterior, es necesario encontrar métodos que sean sostenibles para el medio ambiente y que a la vez nos ayuden a distintas tareas cotidianas. Existen maneras de contribuir a la generación de energías renovables y una de ellas es el proceso de biodigestión el cual se utiliza en su mayoría en zonas rurales. El proceso de generación de biogás con ayuda de un biodigestor es una manera de poder reutilizar la materia orgánica generada en zonas densamente pobladas, pero presenta un problema y es la capacidad de almacenaje que se ve afectada por las dimensiones que necesita para poder ser implementada.

Una alternativa al uso de los biodigestores es la eliminación de los tanques de almacenamiento del biogás, para ello se pretende diseñar un sistema que nos permita mezclar el gas producido por el proceso de la biodigestión y el gas doméstico sin necesidad de ser almacenado. Para ello se requieren de ciertos parámetros de funcionabilidad y de seguridad. Entre los cuales sería el paso en una sola dirección del flujo sin que este retorne hacia el combustible doméstico y/o hacia el biodigestor. Como resultado de esta investigación, se determinó que utilizar el biogás bajo demanda es una alternativa que evita el uso de sistemas de almacenamiento. Para lograr este objetivo, se propone un eyector tipo Venturi impulsado por una fuente primaria de gas almacenada a alta presión. Al fluir el gas de alta presión, por efecto Venturi, se extraerá el biogás generado mezclando ambos gases para su uso cotidiano. Con esta propuesta, se pretende minimizar el uso de los combustibles domésticos y poder reducir la mayor cantidad de desechos orgánicos generados en zonas urbanas. Con ello se reduciría los gases de efecto invernadero en el mundo.

Abstract

Nowadays we have many industrial and climatic changes. In some cases, this can give us an advantage or can give us a disadvantage depending on the case, so we have to look for methods that are sustainable for the environment and at the same time help us in different daily tasks. There are ways to contribute to the generation of renewable energy and one of them is the biodigestion process which is mostly used in rural areas. The process of generating biogas with the help of a biodigester is a way to reuse the organic matter generated in densely populated areas, but it presents a problem and that is the storage capacity that is affected by the dimensions needed to be implemented.

An alternative to the use of biodigesters is the elimination of biogas storage tanks, for this we intend to design a valve that allows us to mix the gas produced by the biodigestion process and domestic gas without the need to be stored. This requires certain parameters of functionality and safety of the valve to be designed. Among which would be the passage in only one direction of the flow without it returning to the domestic fuel and / or to the biodigester.

As a result, we will obtain a design of a valve as an alternative to biogas storage tanks, with the aim of minimizing the use of domestic fuels and reducing the amount of organic waste generated in urban areas. This would reduce greenhouse gases in the world

Índice General

Contenido

Resumen	III
Abstract	IV
Índice Tablas	2
Índice de Figuras	3
Índice de Graficas.....	4
Lista de Nomenclatura	5
1 Introducción.....	6
1.1 Planteamiento del problema	7
1.2 Objetivo General.....	8
1.3 Objetivos Específicos	8
1.4 Justificación del estudio	8
2 Marco Teórico.....	9
3 Estado del arte	21
4 Metodología.....	26
5 Resultados y conclusiones	28
Referencias	73

Índice Tablas

Tabla 1. Composición Biogás.....	14
Tabla 2. Estado del arte.....	25
Tabla 3. Geometría estándar de tubos clásicos Venturi (ISO 5167-4).....	28
Tabla 4. Condiciones iniciales del biogás.....	29
Tabla 5. Consumo promedio de biogás FAO.	30
Tabla 6. Geometría del Venturi Clásico.....	35
Tabla 7. Geometría del eyector clásico	35
Tabla 8. Valores promedio de consumo de gas de un quemador doméstico de ENARGAS y METROGAS.....	36
Tabla 9. Valores esenciales para el diseño del Venturi.....	37
Tabla 10. Propiedades del Gas LP.....	44
Tabla 11. Valores iniciales para diseño de eyector.	49
Tabla 12. Valores calculados para el diseño del Venturi.	54
Tabla 13. Datos necesarios para cálculo de orificio de succión.	57
Tabla 14. Comparativa entre los valores teóricos y los valores de la simulación CFD.	65
Tabla 15. Resultados de la trayectoria del flujo de la presión y velocidad.....	66

Índice de Figuras

Figura 1. Digestión Anaeróbica.....	13
Figura 2. Esquema de planta de biogás.....	16
Figura 3. Modelo básico del Eyector.	44
Figura 4. Croquis del Venturi sin toma de succión.	58
Figura 5. Modelo solido del Venturi en SolidWorks.	59
Figura 6. Modelo solido en vista frontal, vista derecha y vista frontal con un corte longitudinal.....	59
Figura 7. Diseño Eyector en SolidWorks.	60
Figura 8. Nombre del proyecto en Wizard.....	60
Figura 9. Unidades del sistema.....	61
Figura 10. Tipo de análisis.....	61
Figura 11. Fluido predeterminado para el sistema.	62
Figura 12. Condición de frontera para la entrada del Eyector (Gas LP).....	62
Figura 13. Condición de Frontera para la toma de succión del Eyector (Biogás).	63
Figura 14. Selección de Variables “Goals” y condiciones de frontera en SolidWorks.	63
Figura 15. Resultados de la Simulación del eyector.	64
Figura 16. XY Plot a lo largo del eje.....	65
Figura 17. Líneas de flujo del gas LP.....	69
Figura 18. Líneas de flujo del biogás	70
Figura 19. Cut plot de la presión del eyector	71
Figura 20. Cut plot de la velocidad del eyector	71

Índice de Graficas

Grafica 1. Comparativa de potencia: biodigestor casero vs quemadores domésticos.....	43
Grafica 2. Trayectoria de la presión en el Eyector.	67
Grafica 3. Trayectoria de la velocidad en el Eyector.	67

Lista de Nomenclatura

Símbolo	Descripción
Q	Potencia térmica o flujo de calor
$\dot{Q}$	Potencia térmica (tasa de aporte de energía)
$\dot{Q}_{\text{bio}}$	Aporte térmico del biogás al quemador
$\dot{Q}_{\text{LP}}$	Aporte térmico del gas LP al quemador
PCI	Poder calorífico inferior (genérico)
PCI_{LP}	Poder calorífico inferior del gas LP
PCI_{bio}	Poder calorífico inferior del biogás
$\dot{m}$	Caudal másico genérico
$\dot{m}_{\text{bio}}$	Caudal másico de biogás
$\dot{m}_{\text{LP}}$	Caudal másico de gas LP
$\dot{m}_{\text{out}}$	Caudal másico total a la salida del eyector (LP + biogás)
$Q_{\text{bio},s}$	Caudal volumétrico de biogás disponible en el biodigestor
$Q_{\text{LP},s}$	Caudal volumétrico de gas LP que entra al eyector
Q_{out}	Caudal volumétrico total de salida del eyector
ρ	Densidad del gas
ρ_{LP}	Densidad del gas LP
ρ_{bio}	Densidad del biogás
P	Presión estática genérica
P_1	Presión estática en la sección de entrada del Venturi
P_2	Presión estática en la garganta del Venturi
P_{atm}	Presión atmosférica
ΔP	Caída de presión o diferencial de presión
v	Velocidad asignada del flujo
v_1	Velocidad en la sección de entrada del Venturi
v_2	Velocidad en la garganta del Venturi
v_3	Velocidad a la salida del difusor
D_1	Diámetro de entrada del Venturi
D_2	Diámetro de la garganta del Venturi
D_3	Diámetro de salida del difusor del Venturi
β	Relación de diámetros del Venturi (Beta ratio)
L_{conv}	Longitud del cono convergente del Venturi
L_{garganta}	Longitud de la garganta del Venturi
L_{dif}	Longitud del cono divergente (difusor)
L_{ent}	Longitud del tramo recto de entrada
L_{sal}	Longitud del tramo recto de salida
α_c	Angulo del cono convergente
α_d	Angulo del cono divergente (difusor)
A_s	Área del orificio de succión de biogás
D_s	Diámetro del orificio de succión de biogás
C_d	Coeficiente de descarga del orificio de succión

1 Introducción

El problema de la contaminación es tan antiguo como el surgimiento de las primeras civilizaciones. Mientras las civilizaciones crecen, la contaminación surge como un problema: la acumulación de desechos tiene efectos catastróficos sobre los habitantes. Por ejemplo, a falta de sistemas de gestión apropiados, mientras la generación de desechos orgánicos incrementa exponencialmente, se ven afectados ríos y arroyos, destino final de los desechos. Esta contaminación del entorno da lugar a nuevas enfermedades y plagas que afectan a la población. Una de estas catástrofes ocurrió en Londres en 1858, donde se registró un fenómeno conocido como “El Gran Hedor” o “La Peste Negra”. Esta plaga trajo consigo el fallecimiento del 30-60% de la población, en consecuencia, provocó una profunda crisis económica al afectar la actividad económica por falta de mano de obra. Al verse afectadas actividades primarias como la agricultura, también escaseó la producción de alimentos, lo que aumentó la mortandad por la hambruna consecuente.

La contaminación ambiental es un problema muy grande para la estabilidad de cada uno de los ecosistemas que componen al planeta tierra. Estudios de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) demuestran que la temperatura global ha ido en aumento desde la era preindustrial; la causa principal de este acontecimiento son las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre dichos gases, por su abundancia, destacan el Metano y el Dióxido de Carbono. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), según su base de datos del 2022, el 99% de la población mundial respira aire con niveles de contaminación superiores a los establecidos como saludables [1].

Para combatir el calentamiento global, la humanidad ha desarrollado planes y programas destinados a reducir la emisión de agentes contaminantes generados en zonas urbanas y rurales, sin embargo, dichos planes son constantemente superados por el desarrollo tecnológico que, a su vez, resulta en mayores emisiones. Esta carrera ha resultado en la optimización de los métodos de recuperación y disminución de emisiones. Ejemplo de lo anterior es el uso de vertederos. Esta forma de gestión de residuos ha sido utilizada desde la prehistoria, adaptándose con el paso del tiempo hasta la actualidad. El éxito de este método radica en su bajo costo, aun cuando presenta severas desventajas: la descomposición de los

desechos orgánicos resulta en la filtración de contaminantes en suelos y sistemas hídricos, y la emisión de gases al medio ambiente.

A pesar de la utilidad y popularidad de estos sistemas de biodigestión, es una tecnología poco utilizada debido a sus grandes dimensiones. Los lugares donde se lleva a cabo la biodigestión suelen ser muy grandes, y producen biogás con presiones tan bajas que se requieren grandes volúmenes de almacenamiento. Si bien una alternativa sería el licuado a presión, los sistemas de bombeo podrían consumir más energía de la que se produce. Por estas razones, el uso de biodigestores se ha limitado a zonas rurales o a zonas industriales. En cambio, en zonas urbanas, que es donde más biomasa se produce, la implementación de un biodigestor resulta costosa y difícil. La densidad poblacional hace que el espacio por habitante sea reducido, limitando la implementación de un sistema de grandes dimensiones.

Como alternativa, se han propuesto sistemas de biodigestión de pequeñas dimensiones. Un biodigestor cuyas dimensiones le permita ser instalado en un departamento pequeño resolverá una interesante paradoja: la inviabilidad de implementar sistemas de biodigestión en los entornos donde se produce la mayor cantidad de biomasa. Para reducir las dimensiones de los sistemas de biodigestión, se ha apostado al rediseño de los reactores, sustituyéndolos por tanques de biodigestión modulares, entre otras soluciones. Una alternativa interesante podría ser la búsqueda de métodos que permitan reducir las dimensiones de los tanques de almacenamiento de gas sin el requerimiento de sistemas de bombeo.

1.1 Planteamiento del problema

La acumulación masiva de residuos orgánicos en espacios abiertos, donde se descomponen lanzando gases nocivos al medio ambiente, es una práctica que no ha podido ser erradicada debido a la dificultad que presenta la implementación de métodos alternativos de gestión de residuos en zonas urbanas debido a que estos sistemas de gestión requieren de espacios muy amplios mientras que en los centros poblacionales cada vez es mayor la escasez de espacio físico.

1.2 Objetivo General

Desarrollar un sistema que permita utilizar el biogás generado por un biodigestor bajo disponibilidad, evitando el uso de sistemas de almacenamiento.

1.3 Objetivos Específicos

1. Estudiar las condiciones y disponibilidad de biogás en sistemas de biodigestión.
2. Seleccionar y analizar fuentes de energía de respaldo para el suministro de gas en sistemas residenciales.
3. Diseñar un sistema que permita utilizar, bajo demanda, el biogás proveniente del biodigestor sin interrupciones en el suministro.
4. Diseñar un sistema de antirretorno que evite la contaminación del biorreactor.

1.4 Justificación del estudio

La implementación de estrategias para generar energía es fundamental para el desarrollo económico de una nación, si estas estrategias incluyen planes para la gestión de residuos, será posible reducir la huella de carbono de los grandes centros poblacionales al recuperar los gases de efecto invernadero emitidos por la descomposición de residuos orgánicos para ser utilizados como energía limpia. Si esta solución se adapta a las necesidades de las zonas de mayor densidad poblacional, se estaría resolviendo una importante contradicción: donde se generan más desechos y se consume más energía, es donde menos posible es implementar biodigestores o sistemas de gestión de residuos que permitan obtener energías limpias.

2 Marco Teórico

Nuestro planeta, al que llamamos hogar, experimenta transformaciones significativas en su sistema climático debido a diferentes actividades antropogénicas. Este proceso es de gran interés académico debido a que tiene profundas implicaciones humanas que nos llevan a la reflexión sobre la razón por la cual estamos pasando por una crisis climatológica.

Cambio Climatológico

La humanidad, durante siglos, ha confiado en el carbón, el petróleo y el gas natural para mover grandes industrias y proveer de energía eléctrica a nuestro mundo. Dichas fuentes de energía han sido clave en nuestro progreso, siendo los cimientos sobre los que construimos ciudades e industrias. En consecuencia, la Tierra ha sufrido por la enorme cantidad de gases que han sido liberados en la atmósfera. Estos gases nocivos han dañado considerablemente los ecosistemas que compone la Tierra; dichos gases son conocidos generalmente como Gases de Efecto Invernadero. [1]

Efecto invernadero

La atmósfera de nuestro planeta está confirmada por diferentes gases suspendidos en el aire que nos rodea. Los más importantes, por su abundancia, son: el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso. Estos gases tienen un trabajo crucial: son los encargados de retener el calor del sol que llega a la Tierra, como si fuese un invernadero. Sin este invernadero, nuestro planeta sería un lugar helado e inhabitable. Gracias a la atmósfera, la temperatura en nuestro planeta es la adecuada para que la vida prospere.

Es crucial entender que esta capa de gases no es un problema en sí misma, el problema radica en el engrosamiento acelerado que hemos provocado al liberar de manera indiscriminada gases al medio ambiente. Como resultado, surge un calentamiento global como manifestación evidente del uso excesivo de fuentes de energía fósil, lo que altera el delicado balance térmico de nuestro planeta.

Aunque existen maneras de mitigar la contaminación ocasionada por la actividad humana,

los planes de mitigación no han sido efectivos. En el gran ciclo de la vida, la descomposición es tan crucial como el crecimiento. Sin embargo, en nuestros sistemas modernos, hemos interrumpido este flujo. La fracción orgánica de nuestros residuos, compuesta por restos de alimentos y materiales de jardín, a menudo termina aislada en vertederos, representando una oportunidad perdida y un desafío ambiental. [2]

Afortunadamente, existen métodos consolidados que nos permiten reincorporar esta valiosa materia a los ciclos naturales, transformando lo que consideramos un desecho en un recurso fundamental. Estos procesos no son más que la gestión controlada de los mecanismos que la propia naturaleza ha perfeccionado a lo largo del tiempo.

Materia Orgánica en zonas urbanas

La materia orgánica es un punto clave para el impacto climatológico que tenemos hoy en día, la población está creciendo exponencialmente y a su vez la producción de materia orgánica ha ido en crecimiento. Algunos métodos de reciclaje de la materia han ayudado a minimizar el impacto que esta tiene al descomponerse y liberar gases que son dañinos para el medio ambiente. Al tener menos espacio y no poder controlar la ingesta diaria de residuos, se han buscado métodos para reutilizar los residuos orgánicos de manera que pueda ser beneficio para la población.

La materia orgánica se compone principalmente de desechos que van desde los residuos de alimento hasta residuos de la naturaleza, como son hojas y ramas. Con el paso de los años se han descubierto maneras de utilizar esos gases que se desprenden por la descomposición natural de los residuos, aprovechándolos como energía para el hogar y así evitando el almacenaje innecesario. [3]

Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica es un sofisticado proceso biotecnológico que sucede en ausencia de oxígeno. En este sistema los residuos orgánicos como lo son restos de alimento, estiércol o residuos generados en zonas rurales como lo son los agrícolas se descomponen de manera controlada y en sistemas donde se evita el paso del oxígeno como se mencionaba se obtiene

una mezcla de gas rica en metano de alto valor energético y otros gases en cantidades más pequeñas. Por último, la digestión genera un segundo producto el cual se le denomina Digesto el cual se compone principalmente de nitrógeno, fosforo, potasio y otros micronutrientes en menor cantidad y tiene un uso muy importante y positivo para el ambiente como biofertilizante.

La eficacia del proceso se basa completamente en mantener en equilibrio en cada uno de los microorganismos que se van produciendo a través de todo el proceso. Al mantener cada grupo de microorganismos en un ambiente propicio para la generación de biogás y del producto final se concentra en las propiedades del biodigestor como son las condiciones físicas y químicas. [4]

Temperatura: Para que inicie el proceso se requiere un rango de temperatura idóneo para la generación de grupos microbianos y que pueda ocurrir la digestión correcta. El rango se encuentra entre 30-40 °C el cual se llama mesofílico y de 50-60°C que se llama termofílico.

Ph y Alcalinidad: En este proceso se busca un equilibrio y estabilidad de los microorganismos y el rango oscila entre los 6.8 a 7.4.

Relación de Carbono-Hidrogeno: En este proceso se busca tener un balance entre la producción de Carbono respecto a la del Hidrogeno, y se trata de evitar la producción de Amoniaco en mayor cantidad. En este caso la relación de ambos tiene que ser baja para que la descomposición de a materia orgánica sea idónea para la liberación de nutrientes, si es alta el proceso será afectado de manera considerable haciendo más lento el proceso y generando menor calidad en la descomposición.

Tiempo de Retención Hidráulica: Este proceso se basa en el tiempo en el que se produce la liberación del biogás y se retiene en el biodigestor de manera que pueda ocurrir la descomposición en cada uno de sus pasos llegando a la parte final sin ningún problema, si es extraído antes de lograr todo el proceso se puede obtener un biogás de muy baja calidad y por ende una producción de energía mucho menor.

La Biodigestión Anaeróbica tiene 4 etapas que son de suma importancia las cuales son la

Hidrolisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis y cada una de ellas cubre un punto importante para la descomposición de la materia orgánica. En el apartado de biodigestión.

En la Hidrolisis, las bacterias, principalmente Clostridium y Bacteroides, se encargan de descomponer algunas moléculas como las proteínas, grasas y carbohidratos que componen la mayoría de los alimentos, transformándolas en moléculas que son más simples en su composición. Estas moléculas son conocidas como aminoácidos.

Posteriormente, ocurre el proceso de acidogénesis. En esta etapa ocurre el proceso de fermentación, en el que las bacterias consumen cada compuesto simple generado en la hidrolisis para producir principalmente dióxido de carbono e Hidrogeno.

Al concluir la acidogénesis, se da lugar la etapa de acetogénesis. Para continuar la reacción bioquímica, se requiere que los niveles de hidrógeno sean bajos, asegurando que las condiciones termodinámicas sean positivas. Durante la acetogénesis, se busca oxidar los productos de la etapa anterior. Esta etapa es muy importante ya que se encarga de la limpieza de los microorganismos producidos a lo largo del proceso, los cuales serán los encargados de producir el metano.

Por último, ocurre el proceso de metanogénesis. En esta etapa final se produce el Metano con la ayuda de los microorganismos producidos con anterioridad. Para que este proceso ocurra, se requieren factores como el ambiente en el que se encuentran los microorganismos. Este ambiente debe ser hermético, evitando el paso del aire. El rango de temperatura óptimo para este proceso debe oscilar alrededor de 30-40°. El pH debe estar en valores aproximados a los 6.4-7.4. Bajo estas condiciones, el tiempo de descomposición de alrededor de 15-30 días generando aproximadamente una mezcla de aproximadamente 70% de Metano y 30% de dióxido de carbono con trazas de otros componentes extra que son casi despreciables. [5]

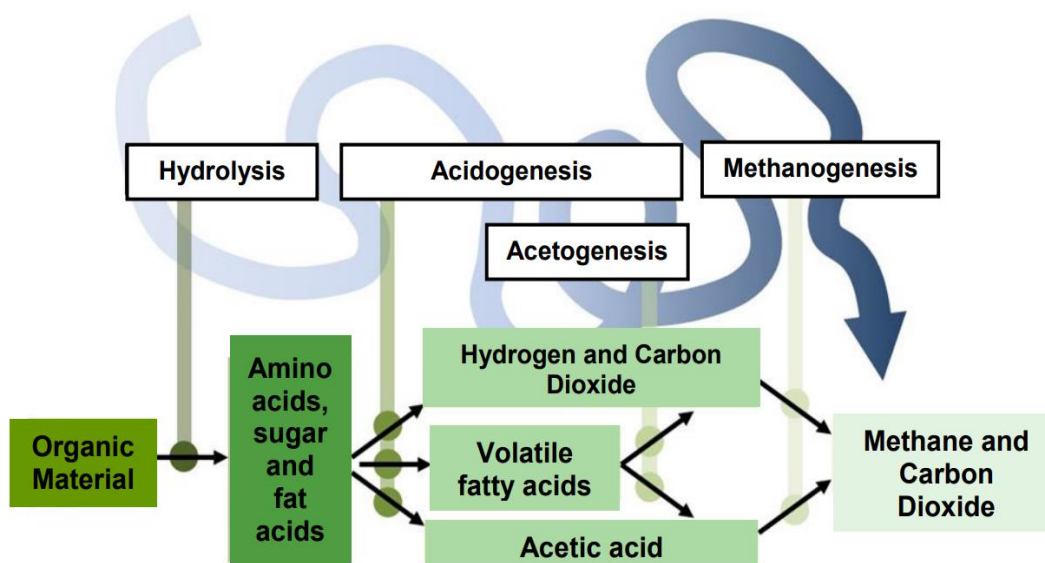


Figura 1. Digestión Anaeróbica. [6]

En conclusión, el proceso de la biodigestión puede ser un proceso largo, pero con grandes beneficios para el reciclaje de la materia orgánica, se necesita tener condiciones favorables en las cuales pueda ocurrir el proceso de manera correcta y con ello evitar la acumulación y el almacenaje de residuos.

Biogás

El biogás es mucho más que un simple subproducto gaseoso; representa la culminación energética del proceso de digestión anaeróbica, el resultado tangible y aprovechable de la compleja sinfonía metabólica ejecutada por el consorcio microbiano. Este producto puede ser concebido como el aliento colectivo de este ecosistema, una exhalación rica en energía que encapsula el carbono de la materia orgánica residual y lo transforma en un vector energético renovable. Su identidad no es la de un compuesto químico singular, sino la de una mezcla de gases cuya composición narra la historia de su origen: el tipo de sustrato digerido y las condiciones específicas del proceso que le dio vida.

Como se mencionó con anterioridad el biogás está hecho principalmente de dos ingredientes. El más importante es el metano, el cual se compone el 70% del gas producido el cual es el componente principal de la mezcla por ende a mayor cantidad de metano que se produzca, mejor será la calidad del gas para uso calorífico. El otro compuesto es el dióxido de carbono,

el cual compone el 60% de la mezcla, y su función principal es regular y mantener un equilibrio en el PH en el último proceso de la Digestión Anaeróbica. Una de las desventajas que tiene es que si se produce en mayor cantidad se pierde el poder calorífico del gas por lo cual se busca que siempre se encuentre en un valor optimo sin afectar la mezcla. [7]

Componente	Fórmula	Porcentaje
Metano	CH ₄	40-70
Dióxido de carbono	CO ₂	30-60
Hidrógeno	H ₂	0.1
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0.1

Tabla 1. Composición Biogás. [8]

Producción y Composición del Biogás

La producción de Biogás tiene un impacto importante en el medio ambiente, el utilizar biogás como fuente ya sea principal o secundaria en zonas donde el uso de energía eléctrica es importante minimizaría el impacto negativo que tienen los desechos orgánicos que producimos todos los días. Como se habló con anterioridad el biogás es el resultado de una digestión anaeróbica correcta, se compone principalmente de Metano y Dióxido de carbono, siempre y cuando las condiciones iniciales donde se llevara a cabo la descomposición son las adecuadas. [8]

Propiedades Energéticas del Biogás en zonas rurales

Las propiedades del biogás y de su calidad energética dependerán completamente de la cantidad de metano que se produzca, esto quiere decir que mientras más porcentaje de metano tengamos al final del proceso, mayor cantidad calorífica tendrá el biogás que a su vez será la de energía que produciremos. Esto nos puede ayudar a que el gas pueda ser de igual manera mezclado con otros gases con iguales propiedades como lo es el Gas Licuado de Petróleo o Gas Natural, o como único abastecimiento de gas en el hogar. En pocas

palabras, el metano es casi la mayor parte de lo que compone al biogás.

Poder Calorífico del Biogás

El poder calorífico es la cantidad de calor que se transforma en energía cuando este sufre una reacción química, en el caso del biogás el metano es el que produce más energía. Sabemos que el biogás está compuesto por la mezcla de muchos gases que se generan a lo largo de su producción, algunos de estos gases, aunque son casi despreciables afectan el poder calorífico del biogás haciéndolo menos eficiente, en el caso del dióxido de carbono el cual es uno de los elementos que lo componen en su mayoría evita que el metano pueda tener una mayor cantidad de poder calorífico por ende se busca minimizarlo y producir más metano en la mezcla.

En conclusión, para obtener una concentración idónea de biogás es necesario un control del metano en el proceso, a mayor cantidad de metano mayor cantidad de poder calorífico que se transformara en energía. [9]

Biodigestor

Es un contenedor el cual tiene como función la aceleración de la descomposición de la materia orgánica ya que al ser un contenedor cerrado herméticamente el ambiente del mismo no contiene oxígeno. A diferencia de otros métodos de reciclaje, el biodigestor puede ser manipulado para que las condiciones en las cuales ocurra la descomposición sean las más adecuadas para la producción de energía, el cual es el mismo proceso natural por el cual pasan todos los residuos y se le conoce como Digestión Anaeróbica. [10]

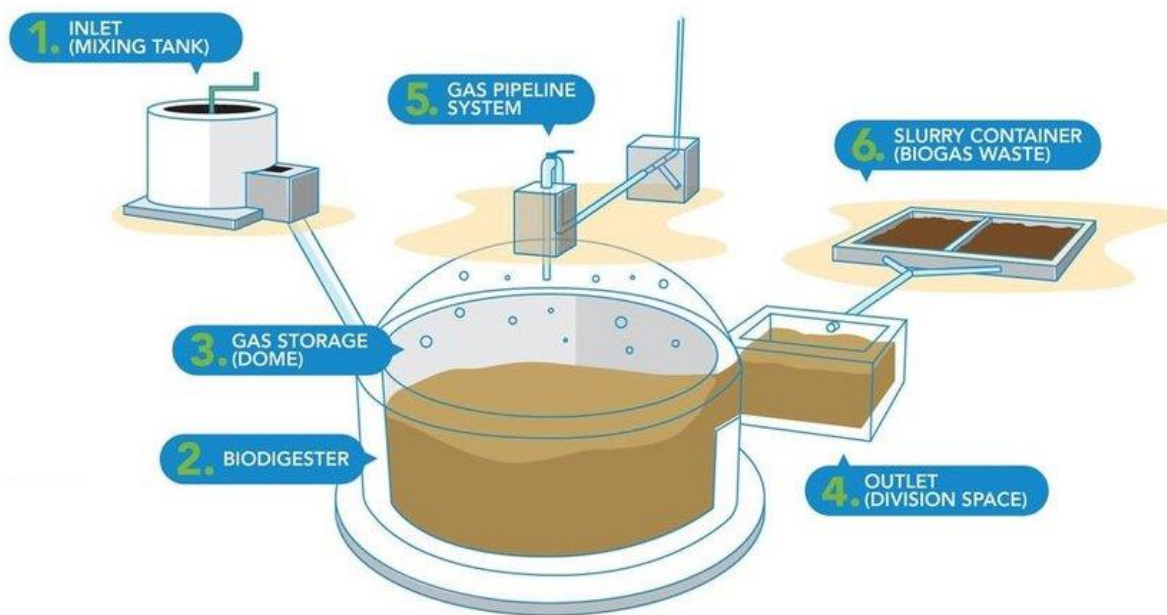


Figura 2. Esquema de planta de biogás. [11]

Eyector

Los eyectores son piezas las cuales no disponen de elementos mecánicos, son estáticos y su función radita en la conversión de la energía de un fluido. Su propósito es generar un diferencial de presión entre un fluido que viaja a una presión mayor el cual se le denomina flujo motriz y este se encarga de succionar al segundo fluido el cual será eyectado. Para que este proceso ocurra se requiere de ciertos parámetros geométricos del eyector. El flujo motriz que se encuentra a muy alta presión se transforma en energía cinética lo cual hace que el fluido viaje a muy altas velocidades en un cierto tiempo. Lo que se busca es que esa misma energía cinética comprima al segundo fluido y pueda ser arrastrado hasta el punto de mezclarse.

Al ser una pieza estática sin partes móviles su ventaja radica en la eficiencia y el costo menor de mantenimiento, una mayor durabilidad, y en general un dispositivo económico en comparación de otros métodos que requieren energía. Una de sus desventajas es que al ser un dispositivo pequeño y sin partes mecánicas que puedan generar una mayor presión de succión, se produce menos energía calorífica a comparación de los que usan impulsores o compresores. [12]

Flujo Motriz en un Eyector

El flujo motriz es un fluido con una alta presión o velocidad de salida, se utiliza para el empuje, succión o desplazamiento de otro fluido con una presión menor. Se puede decir que es un motor que mueve de una dirección a otra un fluido o líquido que por sí solo no puede moverse. Este movimiento se utiliza en sistemas de inyección o eyectores con la finalidad de transferir la energía cinética que posee el flujo motriz a un fluido de mucha menor energía, velocidad y presión.

El principio de funcionamiento del flujo motriz se basa en el Principio de Bernoulli y el Efecto Venturi, uno de los puntos importantes del flujo motriz es la velocidad con la cual circula en una área transversal, este debido a que si esa área se hace convergente o divergente repercute directamente en la velocidad inicial del fluido, en este caso si se vuelve más estrecha sus partículas estarán más juntas y eso generara una mayor velocidad del fluido, por lo cual transforma la energía inicial la cual es energía de presión a una energía cinética. Al ocurrir un vacío en el área más estrecha la cual también se le conoce como Garganta, genera una presión mucho menor a la presión de succión por lo cual existe un diferencial de presión que arrastrara el otro fluido al área más estrecha de la tubería y así lograr una mezcla de ambos.

Principios de la Mecánica de Fluidos y el Efecto Venturi

A lo largo de la historia humana, el ser humano ha buscado maneras de hacer su vida más sencilla, entre algunos nombres importantes que en su momento descubrieron lo que hoy en día conocemos como Mecánica se encuentra un personaje que hizo un descubrimiento importante para la Mecánica de Fluidos, su nombre es Giovanni Battista Venturi el cual descubrió una variable importante en los fluidos al manipular la sección por la cual pasa un fluido haciéndolo más pequeño su diámetro en la cual se ven afectados dos valores importantes en cualquier flujo, la velocidad va a ir en aumento mientras que la presión sufrirá un descenso considerable. En base a ese descubrimiento, las industrias hoy en día usan del Efecto Venturi para realizar muchas operaciones en líneas de producción. [12]

Principio de Bernoulli

Esta Ecuación de Bernoulli como también se le conoce estudia la manera en la cual se comporta un fluido en un conducto cerrado. La energía del fluido a lo largo de todo el proceso no se verá afectada y por consiguiente se mantendrá su energía será constante, esto nos lleva a la siguiente afirmación la cual describe que si la velocidad aumenta la presión se disminuirá para que exista un equilibrio o igualdad en la energía. Para ello tenemos una fórmula que describe todo lo anterior y se compone de la siguiente manera:

$$P + (1/2)\rho v^2 + \rho gh = \text{constante}$$

Donde P será la presión estática, ρ será la densidad del fluido, v es la velocidad de flujo, g es la gravedad a la que es sometido y h es la altura. En base a esa información podemos observar que se compone de la energía de presión, energía cinética por la velocidad del fluido y energía potencial gravitatoria y cada una de ellas está relacionada por lo cual, si una de ellas se modifica, las demás tendrán que cambiar de forma que la energía se mantenga igual o constante en cualquier punto.

Alguna de las aplicaciones en las cuales el principio de Bernoulli tiene un gran impacto es en la ingeniería como lo es la aeronáutica específicamente en las alas de los aviones, las cuales tienen una forma particular que permite ese diferencial de presión que ejerce el aire creando una fuerza llamada sustentación. Otra aplicación importante en el área de la ingeniería es el tubo Venturi, el cual tiene una forma que en un punto se vuelve estrecha y esto ayuda a que el fluido pierda presión y por consiguiente un aumento de velocidad que ayudara a generar una succión tal y como funcionaban los carburadores de los motores o para mezcla de gases.

También este principio ha sido aplicado en algunos atomizadores como por ejemplo las pistolas de pintura, las cuales su principio se basa en el efecto Venturi, donde el aire se encuentra comprimido a una presión alta y al ser activado pasa por un conducto más estrecho succiona la pintura desde el depósito donde se encuentra a baja presión.

Ecuación de Continuidad

La ecuación de la Continuidad es un principio en la Mecánica de fluidos elemental para la conservación de la materia, esta se basa en la relación que tiene el área transversal y la velocidad del fluido, lo que se refiere es que el caudal masico ($\dot{m}$) en cualquier punto de la sección será el mismo en todo el recorrido.

Si es aplicado a fluido se refiere a que la cantidad que entra de fluido por un extremo de un tubo deberá ser la misma cantidad de fluido que salga por el otro extremo, teniendo en cuenta que en la tubería no hay fugas u otra fuente que pase por el mismo. Poniendo el ejemplo de una manguera de agua la cual al ser apretada tendrá que aumentar su velocidad de salida para que el fluido que entra sea el mismo que sale, ya que el área por donde sale.

$$\dot{m}^1 = \dot{m}^2$$

$$\rho^1 A^1 v^1 = \rho^2 A^2 v^2$$

Por otra parte, si el fluido es incomprensible la densidad no tendrá una variación a los cambios de presión por lo cual se eliminan y se simplifica de la siguiente manera.

$$Q = A^1 v^1 = A^2 v^2$$

Y así tenemos la Ecuación de Continuidad con la cual podemos demostrar el Efecto Venturi, la relación del área transversal de una tubería al ser modificada tendrá una variación en la velocidad de la sección transversal. [13]

Geometría de un Venturi

Un Venturi es simplemente un tubo que en una sección de sus partes se vuelve estrecho, teniendo consigo un ángulo de convergencia y un ángulo de divergencia y fue diseñado con el fin de medir el caudal, crear una zona de baja presión en la garganta o para poder mezclar algunos fluidos. Se compone principalmente de 3 partes las cuales son la entrada principal la cual es la sección convergente, la sección donde ocurre el diferencial de presión y es la zona más estrecha del Venturi se le conoce como Garganta, y por último tenemos la salida

o la sección divergente.

Sección Convergente: En esta sección que se conecta en la entrada principal donde se requiere un aumento de velocidad y se va volviendo estrecha de manera gradual, evitando que sea bruscamente para evitar retorno del fluido y con ello pérdidas de velocidad. En base a la normatividad indica que los parámetros de diseño del ángulo de convergencia oscilan entre $21^\circ \pm$, lo que se busca con un ángulo que sea suave evitando así una caída de presión muy brusca que podría generar la separación del flujo.

Garganta: Es la sección en la cual ocurre el efecto Venturi, y es donde el fluido alcanza su velocidad máxima por unos instantes y su presión mínima, para diseño se busca que el diámetro de la garganta los cuales oscilan entre los valores de 0.3 y 0.75 en relación con el diámetro de entrada o la sección convergente. A esta relación se le conoce como relación beta y se define de la siguiente manera:

$$\beta = d/D$$

La cual únicamente es la relación de los diámetros anteriormente mencionados y la relación que hay entre ambos. Para el caso de la longitud de la Garganta en base a la normatividad se busca que el fluido se estabilice por lo cual la medida puede ser muy variada, típicamente se deja el mismo valor que su diámetro.

Sección Divergente: La sección divergente es la parte final de la geometría que compone un Venturi y su función se basa en regular el flujo y evitar pérdidas de energía, en este punto se mantiene constante el flujo y se genera un restablecimiento de la presión y velocidad. [14]

3 Estado del arte

Bui Xuan An et al. (1997) introdujeron en Vietnam un biodigestor tubular de baja tecnología construido con poli-etileno de bajo costo. En un estudio de 194 unidades familiares alrededor de Ho Chi Minh, hallaron un volumen medio de 5,1 m³ y un costo aproximado de USD 25 por digeridor. Estos digestores empezaban a producir gas en unos 17 días tras su instalación. El trabajo destacó la simplicidad del diseño tipo “bolsa” y la participación activa de los campesinos como clave de éxito para generar biogás económico en zonas rurales. [15]

Martí-Herrero et al. (2014) implementaron en Bolivia digestores tubulares flexibles de polietileno como alternativa muy económica. Tras 4.5 años de operación (encuestas en campo y seguimiento), concluyeron que, pese a su menor vida útil, la simplicidad y bajo costo de los “digestores de tubo” los hace apropiados para comunidades pobres. Resaltaron que el éxito dependió más de factores socioeconómicos locales que de la tecnología en sí, convirtiendo la debilidad de vida corta en un “puntal” que permite su reemplazo barato. [16]

Ramaswamy y Vemareddy (2015) diseñaron un reactor de flujo pistón (plug-flow) monolítico de fibra de vidrio de 1 m³ en Bangalore, India. Este biodigestor no tenía tanque flotante separado; en cambio, el gas se almacenó en un globo de caucho externo. Alimentado con estiércol de vaca y residuos de cocina, comenzó a producir biogás a los ~20 días y alcanzó condiciones estables (pH ≈6.5). La construcción compacta (sin tanque pesado) facilitó el transporte e instalación, demostrando que formatos ligeros y removibles pueden funcionar en pequeña escala. [17]

Obileke et al. (2020) fabricaron en Sudáfrica un digeridor plástico de 2.15 m³ usando HDPE para la cámara de digestión y ladrillos/cemento solo en las cámaras de entrada/salida. Desarrollaron ecuaciones de diseño para calcular volumen y mostraron que su prototipo produjo ~4,00 m³ de biogás (60 % metano) con estiércol de vaca. Verificaron la estanqueidad (sin fugas) y obtuvieron un 2,18 m³ de metano, lo que confirma que digestores modulares de plástico rígido (con piezas de PVC) pueden sustituir esquemas convencionales más costosos. [18]

Mungwe et al. (2021) (Camerún) propusieron el “Flexible Biogas Digester System” (FBDS),

un biodigestor doméstico con tubo plástico enterrado. Su estudio presenta paso a paso el cálculo de volúmenes (reactor, almacenamiento de gas, zanja de instalación) en función de parámetros como carga orgánica y temperatura. El FBDS es un tubo cilíndrico de HDPE enterrado (75 % del volumen para la fase líquida, 25 % para gas) con entradas/salidas de PVC. Al proporcionar esta metodología de diseño sistemático en condiciones rurales, demostraron que un digeridor “de plástico” sencillo puede ser viable para hogares de bajos recursos. [19]

Almalowi y Jobran (2022) desarrollaron y probaron un digeridor casero de pequeña escala en Arabia Saudita. Aunque su artículo es general, destacan que alimentar el reactor con dos tipos de residuos orgánicos (por ejemplo, estiércol y desechos de cocina) aumentó significativamente la producción de biogás. Además, observaron que la salida de gas crece con la temperatura ambiente: en pruebas de laboratorio, la producción aumentó conforme subía la temperatura del medio. En resumen, ilustran que la mezcla de sustratos diversos y condiciones térmicas adecuadas son claves para maximizar biogás en un biodigestor hogareño compacto. [20]

Vivallos Soto et al. (2022) construyeron en Chile un biodigestor semiflexible de polietileno aislado con poliestireno para una granja de perros. El reactor (10 m de largo por 1 m² de área) fue alimentado con estiércol canino y, tras 30 días, empezó la producción de biogás. Demostraron que incluso en invierno (15 °C) se pudo generar gas (con picos diarios hasta 70 % CH₄) gracias al aislamiento térmico. Aunque notaron que la producción decae en frío extremo, su diseño indica que tuberías plásticas aisladas pueden eliminar tanques pesados tradicionales, adaptándose a climas templados. Proponen además mantener activa la digesta (añadiendo estiércol de caballo en su caso) para asegurar estabilidad estacional. [21]

Makamure et al. (2024) implementaron en Sudáfrica dos digestores subterráneos de domo fijo de 1 m³; uno con calefacción solar controlada y otro sin sistema de calor. El diseño integró un colector solar con bomba y control Arduino para mantener la temperatura óptima dentro del digestor. Encontraron que el digestor con calefacción mantuvo la temperatura de la mezcla por encima del rango deseado el 82,8 % del tiempo, frente al 0 % del otro. En pruebas en clima mediterráneo insular (Lampedusa) el sistema solar aumentó la producción energética hasta +33,7 %, demostrando que un panel térmico integrado puede aumentar en

~30 % el rendimiento de un biodigestor doméstico sin necesidad de gran tanque adicional. [22]

Issahaku et al. (2024) realizaron en Ghana una revisión sistemática (Heliyon 2024) de diseños de biodigestores pequeños. Recolectaron estudios de 2000–2023 sobre monitoreo en tiempo real, agitación y control de temperatura en digestores de 1–6 m³. Aunque no presentan un invento propio, su aporte clave fue sintetizar avances recientes: destacaron que los sistemas más confiables combinan sensores automáticos, mezcladores periódicos y, en climas fríos, fuentes de calor externas. Subrayan que las mejoras en instrumentación (pH, nivel, temperatura) y operación continua (alimentación diaria y agitación) pueden prescindir de grandes tanques intermedios, al optimizar la producción en reactores compactos. [23]

Alvarez et al. (2025) en Perú modelaron computacionalmente un pequeño biodigestor familiar (4 kg/día de sólidos) adaptado al valle de Chillón. Usaron 30 % residuos orgánicos de cocina y 70 % estiércol bovino en un reactor modelado en Matlab. El modelo matemático obtuvo una precisión $R^2 \approx 98\%$ comparado con datos reales, calculando una producción promedio de ~63,75 L CH₄/kg de materia orgánica. Este trabajo no construyó el digeridor físicamente, pero aportó dimensiones y parámetros óptimos: alto rendimiento metanogénico con tiempos de retención de 20 días, demostrando viabilidad de un diseño predecible para granjas peruanas pequeñas. [24]

Abubakar (2025) en China probó un biodigestor de domo fijo de 0,5 m³ hecho de un tanque de agua de PVC resistente UV. El reactor se llenó con ~120 kg de residuos vegetales y orina diluida, y generó ~1 kg de biogás (0,52 kg CH₄) en 3 meses, comenzando tras 20 días. Introdujo un compresor manual para bombear el biogás hacia cilindros metálicos, evitando cisternas voluminosas. También evaluó la durabilidad: el PVC mantuvo integridad química, pero perdió ~60 % de resistencia mecánica tras 30 días a 20 °C. Con protección UV, estimó que un tanque así duraría 5–8 años, lo que presenta una alternativa ligera a los digestores de cemento o ladrillo, a menor costo y escala. [25]

El Gammal et al. (2025) estudiaron en Egipto cómo adaptar el diseño arquitectónico de casas residenciales para instalar biodigestores domésticos de food waste. Identificaron parámetros clave (espacio en azoteas, cargas estructurales, acceso al gas) y propusieron prototipos de

plantas pequeñas integradas en diferentes tipos de vivienda egipcia. Aunque no construyeron un digeridor específico, su innovación fue proponer soluciones de “bioarquitectura”: por ejemplo, incluir revestimientos impermeables en techos planos para instalar domos compactos, y esquemas de tuberías discretas hacia la cocina. Presentaron análisis de costos y seguridad, concluyendo que los diseños integrados (fijas o inflables) podrían reducir o eliminar tanques externos convencionales, facilitando la adopción casera del biogás sin grandes alteraciones estructurales. [26]

Tabla 1. Resumen del Estado del Arte sobre Implementación de Biodigestores

Autores	Año	Principal Aporte	Lugar
Bui Xuan An et al.	1997	Biodigestor tubular de polietileno de bajo costo para familias rurales en Vietnam.	Vietnam
Martí-Herrero et al.	2014	Digestores tubulares flexibles de polietileno de bajo costo adaptados a comunidades pobres.	Bolivia
Ramaswamy & Vemareddy	2015	Reactor de flujo pistón de fibra de vidrio con almacenamiento externo de gas en globo de caucho.	India
Obileke et al.	2020	Digestor plástico modular de HDPE con diseño económico y producción de biogás estable.	Sudáfrica
Mungwe et al.	2021	Flexible Biogas Digester System (FBDS) basado en tubo plástico enterrado con cálculos de diseño sistemático.	Camerún
Almalowi & Jobran	2022	Biodigestor casero de pequeña escala, mostrando mayor rendimiento con mezcla de residuos y temperatura alta.	Arabia Saudita
Vivallos Soto et al.	2022	Biodigestor semiflexible aislado con poliestireno para estiércol	Chile

		canino, eficiente en invierno.	
Makamure et al.	2024	Domo fijo con calefacción solar integrada y control Arduino, 30% más rendimiento.	Sudáfrica / Italia (prueba)
Issahaku et al.	2024	Revisión sistemática de digestores pequeños (1–6 m³), destaca sensores y agitación para mejorar rendimiento.	Ghana
Alvarez et al.	2025	Modelo matemático de biodigestor familiar (4 kg/día), simulación Matlab con $R^2 \approx 98\%$.	Perú
Abubakar	2025	Biodigestor de domo fijo hecho con tanque PVC de agua de 0.5 m³, compresor manual para gas.	China
El Gammal et al.	2025	Integración arquitectónica de biodigestores domésticos en viviendas urbanas, prototipos adaptados.	Egipto

Tabla 2. Estado del arte.

4 Metodología

En este apartado se describen las actividades que se deberán realizar para alcanzar los objetivos planteados en este proyecto de tesis. Primeramente, se realizó una recopilación de la información más importante y relevante para el proyecto, conceptos clave para poder entender la manera en la cual trabajan los biodigestores en escalas pequeñas. Con base en esa información, se propuso eliminar la necesidad de almacenar el biogás en tanques de almacenamiento manteniendo un consumo constante del mismo. También, se determinó que la producción de un biodigestor no es suficiente para satisfacer las necesidades de un hogar promedio, por lo que se determinó la necesidad de una fuente de gas primaria. Se propone utilizar sistemas de gas tradicionales como fuente de gas primaria. La disponibilidad de tanques de gas LP o de gas natural permitirán abastecer al usuario cuando se agote el biogás. Además, la presión con la que es suministrado el gas primario, pudiera ser utilizada para mover el gas secundario, en este caso, el biogás.

Como punto de partida, se investigó sobre el uso del efecto Venturi para combinar el biogás con el gas principal y así poder reducir costos en el consumo de gas proveniente de las fuentes primarias. Al ser un biodigestor un sistema que produce gas a muy baja presión, el biogás necesitará ser arrastrado hasta su trayectoria final por la dinámica del gas principal.

Para obtener una mezcla homogénea de gas y biogás, se propuso utilizar el Principio de Bernoulli. Este principio establece que al disminuir el área por la cual pasa un fluido, aumenta su velocidad. Un tipo de válvulas que utiliza este principio son las válvulas de tipo Venturi, ampliamente utilizadas para dar mayor velocidad a un flujo en un determinado punto.

Por lo anterior, para el proceso de diseño de una válvula tipo Venturi:

1. Definiremos el principal problema que tiene la implementación de biodigestores en zonas rurales, la cual es el espacio total que ocupa un biodigestor, en este caso, de baja presión, eliminando la necesidad de tanques de almacenamiento. Para ello se tiene que investigar los parámetros adecuados de operación de los gases que se utilizaran en el proceso (Biogás y Gas Licuado de Petróleo) basándonos en los principios de la Mecánica de Fluidos.

Se investigarán diferentes maneras de mezcla de gases en alta y baja presión, maneras de succión de los fluidos y su composición.

2. Se realizará una recolección de datos a lo largo del tiempo con la finalidad de observar la los últimos avances referentes a los biodigestores de baja presión. Con esto se observará los últimos métodos que se han utilizado para reducir el tamaño de los biodigestores para aplicaciones que requieran menos consumo. Se recopilarán cada uno de los métodos o modelos que se utilizan, y con ello, poder evaluar una manera más eficiente de minimizar costos y espacio para su aplicación en zonas urbanas aprovechando los residuos orgánicos.

3. Teniendo los modelos más eficientes y evaluando el desempeño que tienen en campo, se hace una elección del modelo que pueda ayudar al arrastre del biogás, el cual se encuentra con muy baja presión. Para ello, se hace una investigación de las maneras en las cuales un fluido puede ser arrastrado por otro fluido, si en éste se encuentra un diferencial de presión, para de esta manera mezclar ambos gases para su uso continuo.

4. Para este proyecto se utilizará un principio básico de la Mecánica de Fluidos, el cual es el Principio de Bernoulli. Con base en este principio, se propone la construcción de una válvula mezcladora de gases de tipo Venturi, de manera que pueda ser ajustado a un Biodigestor de baja presión utilizando una línea de Gas LP como fuente de gas primaria.

5. Para demostrar la eficacia de la solución propuesta, se realizarán pruebas de Diseño y Simulación con base en los fundamentos del Principio de Bernoulli. Se tomarán diferentes parámetros y condiciones de almacenamiento y disponibilidad del Gas LP y del Biogás.

6. Para su validación, se realizarán diferentes simulaciones utilizando la herramienta SolidWorks, la cual nos ayuda a comprender la manera en la que operaría nuestra válvula.

5 Resultados y conclusiones

Diseño de una Válvula Mezcladora tipo Venturi para Mezcla de Gas LP y Biogás bajo disponibilidad

Para implementar una válvula mezcladora de gases se aprovechan los principios básicos de la Conservación de la Materia. El Principio de Venturi dice que cualquier fluido, al pasar por una sección estrecha de un conducto, se verá afectado en su presión y velocidad, generando una disminución de la presión del fluido y generando mayor velocidad. Para lograr esto, se propone un diseño inicial utilizando valores promedio del biogás, en este caso la presión al no tener un impulso por partes mecánicas, su presión será igual o menor a la atmosférica. La geometría inicial del tubo Venturi, de acuerdo a lo recomendado en la norma ISO 5167-4, se describe en la Tabla 3.

Parámetro	Símbolo	Referencia ISO 5167-4
Diámetro de entrada	D	Según línea (valor utilizado en zona residencial habitualmente de 12 mm)
Relación de diámetros	$\beta = d/D$	0.50–0.60 recomendado (arranque típico 0.50)
Diámetro de la garganta	d	$d = \beta \cdot D$
Longitud de la garganta	L_t	$L_t \approx d$
Ángulo convergente	$\theta_{convergente}$	$21^\circ \pm 1^\circ$
Longitud convergente	L_c	$L_c \approx 2.7 \cdot (D - d)$
Ángulo del difusor	$\theta_{divergente}$	7° (Venturi Clásico)

Tabla 3. Geometría estándar de tubos clásicos Venturi (ISO 5167-4). [14]

Sabiendo que la relación de diámetros interno y externo (β) influye directamente en la velocidad y pérdidas de presión en el sistema, la norma ISO 5167-4, recomienda que el rango óptimo de operación se encuentra entre 0.30 y 0.70. Apoyándose en esta norma, algunos fabricantes utilizan valores promedio de 0.40, 0.50, 0.60 y 0.70. Habitualmente se ha demostrado en la literatura que un valor promedio de 0.50 el cual se encuentra intermedio entre el rango óptimo de operación ya que genera una aceleración del fluido óptimo y no

genera tantas pérdidas en el proceso.

Conexión directa Biogás-Venturi

Como primer modelo se utilizó un tubo Venturi a la salida del biodigestor de baja disponibilidad con el fin de observar el comportamiento del sistema sin la necesidad de un flujo motriz para su impulso. Para este modelo se utilizaron datos de entrada promedio que se describen en la Tabla 4, basados en el consumo de un hogar promedio y en la literatura. El objetivo de este análisis es observar si un Venturi sin flujo motriz puede abastecer la demanda de los quemadores de un hogar en una zona urbana. [14]

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Presión de entrada del biodigestor	$(p_{entrada})$	5-15	mbar
Densidad del biogás	(ρ)	1.2	kg/m ³
Diámetro de entrada del Venturi	$(D_{entrada})$	12	mm
Relación geométrica	$(\beta = D_t/D_1)$	0.5	—
Potencia térmica de un quemador	$(Q_{tér})$	1.2	kW
Poder calorífico del biogás	(PCI)	21.5	MJ/m ³

Tabla 4. Condiciones iniciales del biogás. [14]

Para poder evaluar la viabilidad de la implementación de la válvula en sistemas de biodigestión sin tanques de almacenamiento y bajo disponibilidad, tenemos que conocer los valores en los cuales operan en promedio los biodigestores utilizados en zonas urbanas. Para ello nos basamos de diferentes fuentes de información y de esa manera conocer el flujo promedio del biogás en el sistema. [14]

Uno de los valores más importantes para la evaluación del flujo del gas es el caudal de entrada, el cual nos dictamina la cantidad de volumen del fluido que está pasando por el conducto en un tiempo determinado. Para este valor nos basamos en los datos promedio de consumo del biogás en zonas urbanizadas y rurales para comparar los valores óptimos de producción.

Rangos de Operación	Producción [m³/d]	Caudal [m³/s]
Recomendación Promedio	0.3	3.47222E-06
FAO (China) – rango bajo (mínimo)	0.1	1.15741E-06
FAO (China) – rango bajo (máximo)	0.15	1.73611E-06
FAO BEFS – ejemplo base	0.37	4.28241E-06
SNV/BSP Nepal – planta familiar (bajo)	1	1.15741E-05
SNV/BSP Nepal – planta familiar (alto)	2.5	2.89352E-05
FAO – hogar con corral (bajo)	1	1.15741E-05
FAO – hogar con corral (alto)	1.2	1.38889E-05
Planta familiar típica (8–10 m³)	2	2.31481E-05

Tabla 5. Consumo promedio de biogás FAO. [27]

La generación de biogás en base a la literatura dependerá mucho de la calidad de la materia orgánica que se produzca al día, lo cual puede llegar a ser muy variado por distintos factores como son la cantidad de integrantes en la familia, la calidad de la materia orgánica y la cantidad de materia orgánica que genere cada integrante. Al ser un valor con múltiples variables, se toma de la literatura el valor más óptimo y recomendado en circunstancias y condiciones que se asemejan a la aplicación del biodigestor casero. Específicamente la recomendación de producción de biogás promedio al día es de 0.3 por m³. Ver Tabla 5

Basándonos en los datos consultados en la literatura se puede determinar la geometría del Venturi y comprobar si el Venturi puede abastecer con la presión del biodigestor los quemadores de un hogar sin la necesidad de tanques de almacenamiento o de un flujo motriz.

Ecuaciones para el diseño del eyector

Ecuación 1. Conversión de volumen diario a caudal volumétrico:

$$Q_{bio} = \frac{V_{bio,dia}}{86400}$$

Donde:

Q_{bio} : Caudal volumétrico de biogás [m^3/s]

$V_{bio,dia}$: Volumen de biogás producido por día [$m^3/día$]

86400: Número de segundos que tiene un día [$s/día$]

Ecuación 2. Relación general entre caudal másico y volumétrico:

$$\dot{m} = \rho Q$$

Donde:

$\dot{m}$: Caudal másico del gas (biogás o Gas LP) [kg/s]

ρ : Densidad del gas (biogás o Gas LP) [kg/m^3]

Q : Caudal volumétrico del gas [m^3/s]

Ecuación 3. Potencia térmica a partir de caudal másico:

$$\dot{Q} = \dot{m} PCI_m$$

Donde:

$\dot{Q}$: Potencia térmica del flujo de gas [W]

$\dot{m}$: Caudal másico del gas [kg/s]

PCI_m : Poder calorífico inferior másico del gas [J/kg]

Ecuación 4. Potencia térmica a partir de caudal volumétrico:

$$\dot{Q} = PCI_{vol} Q$$

Donde:

$\dot{Q}$: Potencia térmica del flujo de gas [W]

PCI_{vol} : Poder calorífico inferior volumétrico del gas [J/m^3]

Q : Caudal volumétrico del gas [m^3/s]

Ecuación 5. Balance de potencia en el quemador:

$$\dot{Q}_{LP} = \dot{Q}_{quemador} - \dot{Q}_{bio}$$

Donde:

$\dot{Q}_{LP}$: Potencia térmica que debe aportar el Gas LP [W]

$\dot{Q}_{quemador}$: Potencia total requerida por el quemador [W]

$\dot{Q}_{bio}$: Potencia aportada por el biogás [W]

Ecuación 6. Área de una sección circular:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Donde:

A : Área de la sección transversal [m²]

D : Diámetro interno de la sección [m]

π : Constante pi ≈ 3.14159

Ecuación 7. Velocidad media en una sección:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Donde:

v : Velocidad media del fluido en la sección [m/s]

Q : Caudal volumétrico que atraviesa la sección [m³/s]

A : Área de la sección transversal [m²]

Ecuación 8. Geometría del tramo convergente:

$$\Delta R_c = \frac{D_1 - D_2}{2}, \quad L_{conv} = \frac{\Delta R_c}{\tan(\alpha_c)}$$

Donde:

ΔR_c : Diferencia de radios entre entrada y garganta [m]

D_1 : Diámetro de entrada del Venturi [m]

D_2 : Diámetro de la garganta del Venturi [m]

L_{conv} : Longitud del tramo convergente del Venturi [m]

α_c : Ángulo del cono convergente medido respecto al eje [°]

Ecuación 9. Longitud de la garganta:

$$L_{garganta} \approx D_{garganta}$$

Donde:

$L_{garganta}$: Longitud de la garganta del Venturi [m]

$D_{garganta}$: Diámetro de la garganta del Venturi [m]

Ecuación 10. Geometría del difusor:

$$\Delta R_d = \frac{D_{salida} - D_{garganta}}{2}, \quad L_{difusor} = \frac{\Delta R_d}{\tan(\alpha_d)}$$

Donde:

- ΔR_d : Diferencia de radios entre garganta y salida [m]
- D_{salida} : Diámetro de salida del Venturi [m]
- $D_{garganta}$: Diámetro de la garganta del Venturi [m]
- $L_{difusor}$: Longitud del tramo divergente (difusor) del Venturi [m]
- α_d : Ángulo del difusor medido respecto al eje [°]

Ecuación 11. Bernoulli general con pérdidas:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g z_2 + h_L$$

Donde:

P_1 : Presión estática en la sección 1 [Pa]

P_2 : Presión estática en la sección 2 [Pa]

ρ : Densidad del fluido [kg/m³]

v_1 : Velocidad media en la sección 1 [m/s]

v_2 : Velocidad media en la sección 2 [m/s]

g : Aceleración de la gravedad [m/s²]

z_1 : Altura geométrica de la sección 1 [m]

z_2 : Altura geométrica de la sección 2 [m]

h_L : Pérdida de carga entre las secciones 1 y 2 [Pa]

Ecuación 12. Caudal volumétrico en el orificio de succión de biogás:

$$Q_{bio} = C_d A_s \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho_{bio}}}$$

Donde:

Q_{bio} : Caudal volumétrico de biogás a través del orificio [m³/s]

C_d : Coeficiente de descarga del orificio [-]

A_s : Área del orificio de succión [m²]

ΔP : Diferencia de presión disponible para succión [Pa]

ρ_{bio} : Densidad del biogás [kg/m³]

Ecuación 13. Diámetro del orificio de succión:

$$D_s = \sqrt{\frac{4 A_s}{\pi}}$$

Donde:

D_s : Diámetro del orificio de succión de biogás [m]

A_s : Área del orificio de succión [m²]

π : Constante pi ≈ 3.14159

Elementos del Venturi clásico y del eyector

Nuestro diseño inicia desde el Venturi clásico, el cual es una geometría básica sin partes móviles y únicamente con variaciones de diámetros. Para poder iniciar con un diseño tenemos que conocer las partes que componen al Venturi clásico como se muestra en la tabla 4.

De esta manera basándonos en el diseño del Venturi podemos partir a un diseño final de nuestra válvula, utilizando la misma geometría clásica del Venturi, pero modificando su geometría al agregar una toma de succión como se muestra en la tabla 7.

Elemento	Símbolo
Diámetro de entrada	$(D_{entrada})$
Diámetro de garganta	$(D_{garganta})$
Longitud convergente	(L_{conv})
Longitud de garganta	$(L_{garganta})$
Longitud divergente	(L_{div})

Tabla 6. Geometría del Venturi Clásico. [28]

Elemento del eyector	Símbolo
Diámetro de entrada	$D_{entrada}$
Longitud de entrada	$L_{entrada}$
Diámetro de garganta / mezcla	$D_{garganta}$
Longitud de garganta / mezcla	$L_{garganta}$
Diámetro de salida	D_{salida}
Longitud del difusor	$L_{difusor}$
Diámetro de la toma de succión	$D_{succion}$
Longitud de la toma de succión	$L_{succión}$
Longitud total del eyector	L_{total}

Tabla 7. Geometría del eyector clásico. [29]

Para poder conocer la velocidad de entrada y la velocidad de la garganta tenemos que basarnos en el valor del caudal el cual se especifica en la Tabla 5, en el cual nos indica la producción diaria o volumen total de biogás que se produciría cada día dependiendo el caso. Para este caso el biodigestor casero produciría un volumen de $V_{biogás} = 0.30 \text{ m}^3/\text{día}$ el cual tendríamos que convertir a caudal continuo para poder obtener el flujo volumétrico por segundo y el cual se obtiene de la siguiente formula:

$$Q = \frac{V_{biogás}}{t(\text{día en segundos})}$$

Por lo tanto, sustituyendo los valores nos quedaría el siguiente valor:

$$Q_{biogas} = \frac{0.30 \text{ m}^3}{86\,400 \text{ s}} = 3.4722 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Para conocer si el caudal es capaz de alimentar a los quemadores de un hogar tenemos que conocer el consumo con el cual se pueden abastecer los quemadores en L/min. Como se muestra en la Tabla 8, el consumo mínimo para que un quemador pueda funcionar de manera correcta es de 1.67 L/min o en su defecto de 1.2 kW en potencial térmico.

Tipo de quemador / estufa doméstica	Consumo de gas (m ³ /s)	Consumo equivalente (L/min)	Potencia térmica (kW)
Quemador chico	2.78×10 ⁻⁵	1.67	1.2
Quemador mediano	4.17×10 ⁻⁵	2.5	1.6
Quemador grande	5.28×10 ⁻⁵	3.17	2.1

Tabla 8. Valores promedio de consumo de gas de un quemador doméstico de ENARGAS y METROGAS. [30] [31]

Teniendo en cuenta que la cantidad de biogás que se produciría con este modelo sería muy baja, se tomaría como referencia el valor mínimo requerido para que un quemador chico funcione como lo especifica la Tabla 8, el cual menciona que con un consumo de 1.67 L/min se podría abastecer un quemador sin pérdidas y operando de manera normal.

Diseño y Prueba sin flujo motriz (Venturi)

Para conocer la capacidad del biogás de abastecer una línea de gas residencial y de poder observar si es factible la implementación únicamente de un solo gas, en este caso el biogás como línea de consumo principal, se tomaron datos para estructurar de manera correcta el diseño del Venturi los cuales son los necesarios para hacer un cálculo real del consumo y aportación del biogás.

Parámetro	Simbología	Valor	Unidad
Producción diaria de biogás	$V_{\text{biogás}}$	0.30	m ³ /d
Tiempo de un día	$t_{\text{día}}$	86400	s/d
Presión atmosférica de referencia	P_{atm}	101325	Pascales
Densidad del biogás (aprox.)	ρ	1.20	kg/m ³
Viscosidad cinemática (aprox.)	ν	1.5×10^{-5}	m ² /s
Diámetro de entrada	D_{entrada}	12	mm
Relación beta	β	0.5	—
Diámetro de garganta	D_{garganta}	6	mm
Diámetro de salida	D_{salida}	12	mm
Ángulo de convergencia	θ_c	21	°
Ángulo de divergencia	θ_d	7	°
PCI biogás ($\approx 60\% \text{ CH}_4$)	PCI	21.5	MJ/m ³

Tabla 9. Valores esenciales para el diseño del Venturi.

Diseño Geométrico básico del Venturi

Para el diámetro de entrada o diámetro inicial se eligió el valor de $D_{\text{entrada}} = 12 \text{ mm}$ el cual es un valor que se utiliza en su mayoría en las líneas de tuberías de gas de zonas residenciales y para la relación Beta en base a la normatividad y diseño de tubos Venturi clásicos el valor es de 0.5. [14]

En el caso de las longitudes las cuales son en la sección convergente y divergente, nos basamos de la geometría de un triángulo rectángulo, ya que para el caso de un Venturi Clásico dividimos la sección del Venturi a la mitad para tener dos triángulos tanto en la sección convergente como en la divergente y de esta manera poder aplicar la fórmula de los catetos.

Los ángulos adaptados para este sistema se basan de igual manera de la ISO 5167-4 la cual menciona que los valores típicos de operación de un Venturi clásico para la zona convergente son de 21° y para la zona divergente de 7 y 8° como recomendación para tubos Venturi clásicos. La justificación del uso de los ángulos 21° (convergencia) y 7° (divergencia) se basan

en la literatura y el diseño que en este caso sea lo más compacto sin pérdidas de energía. Como se mencionó en el anterior párrafo, la ISO 5167-4 rige el diseño de los tubos clásicos Venturi y al igual que Crane, Munson en su edición 2013 menciona que para el ángulo de convergencia de 21° es el mejor ya que el Venturi es más corto en su longitud sin pérdidas considerables de energía. Para el caso del ángulo de divergencia la ISO 5167-4 menciona que un rango de 7° hasta 15° puede ser utilizado para tubos Venturi clásicos, pero hace énfasis en que los ángulos que muestran menos pérdidas de energía y maximizan la recuperación de presión después de pasar por la garganta están entre los valores de 7 y 8° , en el caso de Crane no menciona un valor óptimo pero menciona que el exceder los 8° de divergencia genera mayor turbulencia y pérdida, y en algunos otros como el libro de Miller Flow Measurement Engineering Handbook también al igual que la ISO, menciona un rango de 7 - 15° . En base a estos se han realizado varias pruebas en tubos Venturi clásicos y se ha demostrado la eficacia que tienen estos ángulos para el diseño. [14] [32]

Para ello aplicaremos la fórmula de la tangente y así poder determinar la longitud de las secciones faltantes del Venturi. Para el caso de la sección divergente utilizaríamos la siguiente fórmula:

$$\tan(\theta_c) = \frac{\Delta r_c}{L_c} = \frac{r_1 - r_t}{L_c},$$

Despejando de la fórmula la longitud convergente nos quedaría de la siguiente manera:

$$L_c = \frac{r_1 - r_t}{\tan(\theta_c)},$$

Sustituyendo los valores de r_1 y r_t en la ecuación nos quedaría la fórmula que utilizaríamos para el cálculo de la longitud convergente y sería la siguiente:

$$L_c = \frac{D_1/2 - D_t/2}{\tan(\theta_c)},$$

Despejando con los valores de diseño de la tabla 6, nos quedaría el siguiente resultado:

$$D_1 = 12 \text{ mm}, \quad D_t = 6 \text{ mm}, \quad \theta_c = 21^\circ,$$

$$L_c = \frac{12 \text{ mm} - 6 \text{ mm}}{2 \tan(21^\circ)} = \frac{6 \text{ mm}}{2 \tan(21^\circ)} \approx \mathbf{7.8 \text{ mm}}$$

Ahora hacemos el mismo procedimiento, pero para la longitud divergente o la sección del difusor, en este caso nos quedaría de la siguiente manera:

$$\tan(\theta_d) = \frac{\Delta r_d}{L_d} = \frac{r_2 - r_t}{L_d}$$

Por lo tanto, simplificando nos quedaría el siguiente resultado:

$$D_2 = 12 \text{ mm}, \quad D_t = 6 \text{ mm}, \quad \theta_d = 7^\circ,$$

$$L_d = \frac{12 \text{ mm} - 6 \text{ mm}}{2 \tan(7^\circ)} = \frac{6 \text{ mm}}{2 \tan(7^\circ)} \approx \mathbf{24.4 \text{ mm}}$$

Ahora únicamente nos quedaría calcular el diámetro de la garganta del Venturi y para utilizamos la fórmula de relación Beta, como asignamos anteriormente el valor de Beta en 0.5 y con el diámetro de entrada de la tubería de 12 mm, calcularíamos el diámetro de la garganta. [14] [32]

$$\beta = \frac{D_{garganta}}{D_{entrada}}$$

Despejamos de la ecuación a $D_{garganta}$,

$$D_{garganta} = \beta D_{entrada} = 0.5(0.012) = 0.006 \text{ m} = 6 \text{ mm}$$

$$D_{garganta} = \mathbf{6 \text{ mm}}$$

De esta manera obtenemos toda la geometría del Venturi, ahora podemos proceder a hacer los cálculos de la depresión de la garganta y cálculo de potencial térmico y determinar si es factible su aplicación con el caudal de Caudal de entrada de $3.4722 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

Para la obtención de las velocidades del Venturi tenemos que calcular sus áreas de paso (A

entrada, $A_{garganta}$ y A_{salida}).

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow A_{entrada} = \frac{\pi D_1^2}{4}, A_{garganta} = \frac{\pi D_t^2}{4}, A_{salida} = \frac{\pi D_2^2}{4}$$

$$A_{entrada} = \frac{\pi(0.012)^2}{4} = \mathbf{1.130973 \times 10^{-4} \text{ m}^2},$$

$$A_{garganta} = \frac{\pi(0.006)^2}{4} = \mathbf{2.827433 \times 10^{-5} \text{ m}^2},$$

$$A_{salida} = A_{entrada} = \mathbf{1.130973 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

Con los valores de las áreas de paso del Venturi calculadas podemos conocer la velocidad de entrada del gas hacia el Venturi y la velocidad en la garganta, la cual se calcula de la siguiente manera:

$$v_{entrada} = \frac{Q}{A_{entrada}} = \frac{3.4722 \times 10^{-6}}{1.130973 \times 10^{-4}} = \mathbf{3.0701 \times 10^{-2} \text{ m/s}}$$

$$v_{garganta} = \frac{Q}{A_{garganta}} = \frac{3.4722 \times 10^{-6}}{2.827433 \times 10^{-5}} = \mathbf{1.22805 \times 10^{-1} \text{ m/s}}.$$

Ya con las velocidades calculadas, podemos proceder a calcular la depresión que ocurre en la garganta del Venturi. Para conocer la depresión que tiene nuestro Venturi en este caso de la entrada a la sección de la garganta, esto con la finalidad de conocer si con el Caudal que proporciona nuestro biodigestor es capaz el Venturi de generar una depresión que pueda generar una succión efectiva para alimentar a los quemadores del hogar, para ello hacemos uso de la ecuación de Bernoulli:

$$P_{entrada} + \frac{1}{2} \rho v_{entrada}^2 = P_{garganta} + \frac{1}{2} \rho v_{garganta}^2$$

despejamos la presión de la garganta y nos queda de la siguiente manera:

$$P_t = P_1 + \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_t^2)$$

$$\Delta P_{\text{entrada} \rightarrow \text{garganta}} = P_{\text{entrada}} - P_{\text{garganta}} = \frac{1}{2}\rho(v_{\text{garganta}}^2 - v_{\text{entrada}}^2)$$

Sustituyendo los valores nos queda el siguiente resultado:

$$\Delta P_{\text{entrada} \rightarrow \text{garganta}} = \frac{1}{2}\rho(v_{\text{garg}}^2 - v_{\text{ent}}^2) = \frac{1}{2}(1.20)[(0.12280)^2 - (0.03070)^2]$$

$$\Delta P_{\text{entrada} \rightarrow \text{garganta}} = \mathbf{8.483 \times 10^{-3} \text{ Pa}}$$

En este punto podemos observar que la depresión calculada es muy baja casi nula para poder abastecer un solo quemador de un hogar, esto nos indica que con el Caudal de entrada de $3.4722 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ es insuficiente para generar una depresión mínima que pueda mantener un flujo constante hacia el quemador.

Q muy bajo $\Rightarrow v$ muy baja $\Rightarrow \Delta P$ despreciable $\Rightarrow$ aire primario insuficiente

Cálculo de Potencial Térmico (kW)

En este caso tenemos que conocer el potencial térmico que nos proporciona el biogás en la salida y poder observar si es suficiente para suministrar a los quemadores, el cual se expresa a partir del PCI (Poder Calorífico Inferior) en el caso del biogás su PCI es de 21.5 MJ/m^3 como lo especifica la Tabla 4, esto en condiciones favorables.

Para conocer el Potencial térmico que tiene el biogás con el caudal de $3.4722 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, tenemos que calcular la energía diaria del biogás con el poder calorífico del biogás (ver tabla 4) y la producción diaria de biogás en condiciones idóneas (ver tabla 3).

$$PCI_{\text{biogas}} = 21.5 \text{ MJ/m}^3, V_{\text{biogas}} = 0.30 \text{ m}^3/\text{d}$$

La fórmula para cálculo de energía diaria en tubos clásicos es la siguiente:

$$E_{\text{día}} = V_{\text{biogás}} \cdot PCI_{\text{biogás}},$$

Sustituyendo los valores en la ecuación, nos quedaría el siguiente resultado:

$$E_{\text{día}} = 0.30 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 21.5 \text{ MJ}/\text{m}^3 = 6.45 \text{ MJ}/\text{día}$$

Para poder comparar este resultado con los quemadores y ver el porcentaje de demanda que podría abastecer con ese caudal es necesario convertir los MJ/d a kWh/d. Sabiendo que $1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ}$, la fórmula para la conversión es la siguiente:

$$E_{\text{día}}(\text{kWh}/\text{d}) = \frac{E_{\text{día}}(\text{MJ}/\text{d})}{3.6},$$

Sustituyendo los valores nos daría el siguiente resultado:

$$E_{\text{día}}(\text{kWh}/\text{d}) = \frac{6.45}{3.6} \approx \mathbf{1.79 \text{ kWh}/\text{día}}$$

Por último, solo lo convertiríamos en potencia promedio equivalente, la cual sería la potencia máxima que podría entregarnos el biodigestor con el caudal de $0.30 \text{ m}^3/\text{d}$

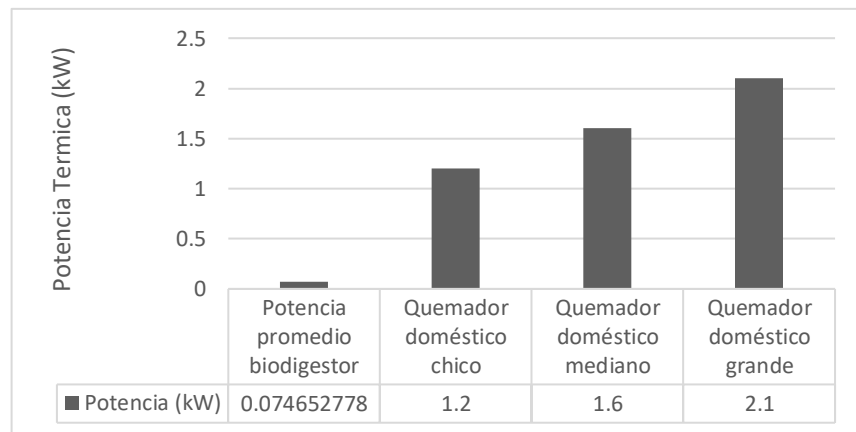
$$P_{\text{prom}} = \frac{E_{\text{día}}(\text{kWh})}{24 \text{ h}} = \frac{1.79}{24} \approx \mathbf{0.0747 \text{ kW}}$$

Con estos resultados podríamos compararlos con los valores promedio con los cuales funciona un quemador chico (ver tabla 5) y de esta manera ver si es viable o no la aplicación de un Venturi sin flujo motriz o tanques de almacenamiento. Sabiendo que un quemador en condiciones ideales trabaja en un rango de $P_q \sim 1.2\text{--}2.1 \text{ kW}$ como lo especifica la tabla 8, podemos hacer la comparativa energética que proporciona el biogás en comparación con la que requiere un quemador chico en este caso y se muestra a continuación:

$$\frac{P_{\text{prom}}}{P_q} = \frac{0.0747}{1.2 \text{ kW}} \approx 6.2\%(\text{Quemador chico})$$

$$\frac{P_{prom}}{P_q} = \frac{0.0747}{2.1 \text{ kW}} \approx 3.6\% (\text{Quemador grande})$$

Para el caso del quemador chico nos estaría dando una relación de apenas el 6.2% y para el quemador grande de 3.6% de un 100% que necesitaría los quemadores para un funcionamiento correcto como se observa en la Grafica 1.



Grafica 1. Comparativa de potencia: biodigestor casero vs quemadores domésticos

Diseño y Prueba con flujo motriz (Eyector)

Como se puede observar el caudal del biogás es muy bajo para ser utilizado como gas principal de consumo del hogar, aunque la geometría del Venturi hiciera correctamente su función, la energía no es la suficiente para mantener a los quemadores simplemente no aguantaría o la flama seria casi nula. Por este mismo motivo se descarta la posibilidad de utilizar únicamente biogás bajo disponibilidad y se optó por el diseño de un Eyector el cual aplica el mismo principio Venturi a diferencia que este requiere de un flujo motriz el cual será el gas LP ya que posee una presión mucho mayor para poder hacer la succión de nuestro segundo fluido el cual será el biogás. En este caso tenemos que conocer las propiedades del gas LP en zonas urbanas en base a la literatura. Ver tabla 10

Parámetro	Símbolo	Valor usado	Unidad
Potencia del quemador considerado	P_{quem}	1.2	kW
Poder calorífico inferior del gas LP	LHV_{LP}, kg	46	MJ/kg
Densidad del gas LP en fase gaseosa	ρ	1.9	kg/m ³
Presión de salida del regulador de LP	P_{reg}	2800	Pa
Temperatura de referencia del gas	T_{ref}	293.4	K

Tabla 10. Propiedades del Gas LP. [30] [33]

La implementación de un Eyector es la opción más viable al ser un dispositivo que únicamente requiere de 2 tomas de entrada, una de la línea principal y otra entrada para la succión, de un estrechamiento de la parte central del Eyector y de una salida resultado de la mezcla de ambos fluidos. Un modelo básico del Eyector se compone únicamente de las partes anteriormente mencionadas y las cuales se muestran en la Figura 3.

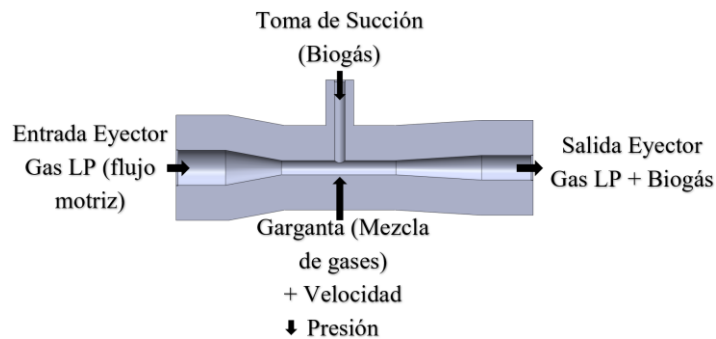


Figura 3. Modelo básico del Eyector.

Para poder conocer el aporte que tendría el utilizar un eyector para mezclar ambos gases, tendríamos que sacar el consumo de energía que aportan para poder abastecer la demanda del quemador, para ello iniciamos de los datos calculados del aporte de energía del biogás en zonas urbanas sin tanques de almacenamiento.

Para tener mayor facilidad en las unidades de medición, convertimos el caudal o flujo volumétrico de producción diaria a producción por segundo. Al no disponer de un tanque de almacenamiento la producción tiene que ser constante por uso a disponibilidad, tomando de nueva cuenta la producción diaria de biogás en zonas urbanizadas que se recomienda en la

literatura [27], la cual es 0.30 m³/d en un rango mínimo, lo cual quiere decir que por cada m³ de volumen del biodigestor producirá 0.30 de biogás y entra perfectamente en el rango de 0.3–0.5 m³/d que se especifica para biodigestores de baja escala. Con la siguiente formula hacemos la conversión de unidades: [35]

$$Q_{bio,s} = \frac{Q_{bio,d}}{24 \cdot 3600},$$

Sustituyendo los valores:

$$Q_{bio,s} = \frac{0.30}{24 \cdot 3600} = \frac{0.30}{86400} \approx 3.47 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \text{ (Caudal Volumétrico Biogás)}$$

Para poder hacer la comparación más adelante de la energía y potencia que aporta dicho caudal al sistema, para ello nos apoyamos de la formula base que especifican en algunas fuentes y libros de mecánica de fluidos [2], la cual es la siguiente:

$$\dot{m} = \rho Q$$

La cual relaciona el flujo masico es igual a la densidad del biogás de 1.20 kg/m³ [3] por el caudal, el cual calculamos anteriormente. Sustituyendo los valores nos queda el siguiente resultado:

$$\dot{m}_{bio} = 1.20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3.47 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \approx 4.17 \times 10^{-6} \text{ kg/s} \text{ (Caudal masico Biogás por disponibilidad)}$$

Con el caudal masico podemos determinar cuanto aporta el biogás hacia los quemadores de la siguiente manera, para ello hacemos uso del PCI que dispone el biogás en condiciones de producción idóneas como lo especifican algunos manuales de producción de biogás [4], el cual es de 21 MJ/m³.

$$\dot{Q}_{bio} = Q_{bio,s} PCI_{bio,V}$$

$$\dot{Q}_{bio} = 3.47 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot 21 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \approx 7.29 \times 10^1 \text{ W} = 0.073 \text{ Kw}$$

Calculo Gas LP hacia quemador

Basándonos en la Potencia térmica que requiere un quemador chico en promedio el cual es de 1.2Kw, queremos saber la cantidad de gas LP que se consume en un quemador chico. Para ello utilizamos el PCI, pero en este caso del Gas LP el cual es de 46MJ/kg y su densidad de 1.9 kg/m³. Como no conocemos el caudal masico que produce el Gas LP para abastecer el quemador utilizamos la siguiente formula:

$$\dot{m}_{LP} = \frac{\dot{Q}_{quemador}}{PCI_{LP,m}}$$

Sustituyendo los valores que ya calculamos nos queda de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{LP} = \frac{1.2 \times 10^3}{46 \times 10^6} \approx 2.61 \times 10^{-5} \text{ kg/s (Caudal masico Gas LP necesario para 1.2kW) (Sin Biogás)}$$

Ahora de igual manera como hicimos con el biogás, calculamos el caudal volumétrico del Gas LP dándonos como resultado lo siguiente:

$$Q_{LP,s} = \frac{2.61 \times 10^{-5}}{1.9} \approx 1.37 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s (Caudal volumétrico Gas LP para 1.2kW) (Sin Biogás)}$$

Relación de arrastre del Eyector (Hidráulico)

Un punto de suma importancia en el Eyector tanto para el diseño como para la comprobación de efectividad es la relación de arrastre que genera en el sistema. En la literatura se especifica la relación de arrastre de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{\dot{m}_{secundario}}{\dot{m}_{flujo\ motriz}},$$

Sustituyendo en nuestro caso sería

$$\mu = \frac{\dot{m}_{bio}}{\dot{m}_{LP}} = \frac{4.17 \times 10^{-6}}{2.61 \times 10^{-5}} \approx \mathbf{0.16}$$

El valor de 0.16 quiere decir que por cada kg de Gas LP que se consuma, el biogás de esa parte estará aportando 0.16 kg, que de manera funcional es poca la cantidad de biogás aportado, pero es una cantidad que puede ser una manera factible de ahorro y de reciclaje a largo plazo. Si nos basamos en los manuales los cuales indican un rango de 0.1 hasta 1 en eyectores de baja escala como rendimiento, el valor de 0.16 entra perfectamente en ese rango mínimo de aporte en el sistema.

Caudales y Potencias (Energético)

Para saber realmente cuanto Gas LP se estaría consumiendo cuando el biogás se mezcle en el eyector únicamente tenemos que hacer una resta de la potencia requerida por el quemador menos la potencia que genera el biodigestor en base al caudal de 0.30 m³/d.

$$Q_{LP} = Q_{quemador} - Q_{bio} = 1.2 - 0.073 \approx \mathbf{1.13 \text{ kW}}$$

Ahora sacamos el porcentaje de ahorro de Gas LP basándonos del resultado del Caudal Volumétrico sin biogás necesario para 1.2kW.

$$Ahorro_{Gas LP} = \dot{m}_{LP(sinbiogas)} - \dot{m}_{LP(conbiogas)}$$

Sustituyendo valores nos queda el siguiente resultado:

$$\dot{m}_{LP(sinbiogas)} = 2.61 \times 10^{-5} \text{ kg/s}, \quad \dot{m}_{LP(conbiogas)} = 2.45 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$$

$$Ahorro_{Gas LP} = 2.61 \times 10^{-5} - 2.45 \times 10^{-5} = 0.16 \times 10^{-5}$$

$$Ahorro_{Gas LP} = \mathbf{1.6 * 10^{-6} \text{ kg/s}}$$

Lo cual sería lo mismo que:

$$Ahorro\% = (\dot{m}_{LP(sinbiogas)} - \dot{m}_{LP(conbiogas)}) / \dot{m}_{LP(sinbiogas)} (100) = \mathbf{6.1\%}$$

Con esto estaríamos ahorrando un 6.1% de Gas LP cada que se utilice bajo disponibilidad y que las condiciones sean las favorables en la producción de biogás, este sería el valor máximo de ahorro teórico que podría proporcionar nuestro biodigestor.

Diseño Geométrico del Eyector

Para el diseño del eyector tenemos que poner unos parámetros de funcionamiento en base a la literatura y de esa manera partir hacia lo que sería el Eyector más óptimo para esos parámetros de operación. En este caso nuestros parámetros de diseño serán las velocidades de entrada y de la garganta.

La velocidad de entrada de nuestro sistema la tomamos de los rangos de operación de líneas de baja presión para tuberías residenciales, en el cual indica que valores entre 15 y 20 m/s generan muchos problemas como corrosión y perdidas de energía, y que el rango recomendado por los manuales de gas doméstico es de 5 – 15 m/s, escogemos el valor de 5 m/s en la entrada como parámetro inicial ya que en promedio es la velocidad a la cual se desplazan los gases en zonas residenciales pero evitando que sea menor que este valor. [14]

Al ser un Eyector y poseer la misma geometría que un Venturi Clásico con ligeras variaciones como la toma de succión se tomaron los ángulos que se especifican en la ISO 5167-4 y evaluando distintas fuentes de información donde demuestran la efectividad del ángulo de convergencia de 21° y el ángulo del difusor o divergente de 7° . [37]

En la tabla 11 se muestran los valores que se usaran para el diseño del Venturi, algunos valores se calcularon y otros fueron tomados de la metodología del diseño del Venturi y Eyectore en la literatura. Con estos valores adaptados se puede diseñar un Eyector con las condiciones que deseamos para su funcionamiento.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Producción diaria de biogás	$Q_{bio,d}$	0.3	$m^3/día$
Caudal de biogás en horas	$Q_{bio,h}$	0.0125	m^3/h
Caudal de biogás en segundos	$Q_{bio,s}$	3.47E-06	m^3/s
Densidad del biogás	ρ_{bio}	1.2	kg/m^3
PCI volumétrico del biogás	$PCI_{bio,v}$	21000000	J/m^3
Potencia del biogás	Q_{bio}	72.9	W
Caudal másico de biogás	m_{bio}	4.17E-06	kg/s
Potencia del quemador	$Q_{quemador}$	1.2	kW
PCI másico del Gas LP	$PCI_{LP,m}$	46000000	J/kg
Densidad del Gas LP	ρ_{LP}	1.9	kg/m^3
Caudal másico original de LP	$m_{LP(sinbiogas)}$	2.61E-05	kg/s
Caudal volumétrico de LP (s)	$Q_{LP,s}$	1.37E-05	m^3/s
Caudal volumétrico de LP (h)	$Q_{LP,h}$	0.049	m^3/h
Velocidad de entrada	$v_{entrada}$	5	m/s
Caudal total mezcla	$Q_{tot,s}$	1.72E-05	m^3/s
Velocidad en la garganta	$v_{garganta}$	35	m/s
Velocidad de salida	v_{salida}	10	m/s
Ángulo convergente	θ_c	21	°
Ángulo divergente o difusor	θ_d	7	°

Tabla 11. Valores iniciales para diseño de eyector.

Calculo diámetro de entrada Eyector

Para el cálculo del diámetro nos basamos de la ecuación de continuidad la cual es la siguiente:

$$Q = v \cdot A \Rightarrow A_{entrada} = \frac{Q_{LP,s}}{v_{entrada}}$$

Calculamos el Área de entrada con los datos de la Tabla 8, sustituyendo de la formula nos quedaría de la siguiente manera:

$$A_{entrada} = \frac{1.37 \times 10^{-5}}{5 \text{ m/s}} \approx \mathbf{2.75 \times 10^{-6} \text{ m}^2}$$

Para determinar el Diámetro de entrada al ser un cilindro su forma es circular y la fórmula para el cálculo geométrico es la siguiente:

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4}$$

De esta fórmula despejaremos el diámetro y con la sustitución de los valores nos queda el siguiente resultado:

$$D_{entrada} = \sqrt{\frac{4A_1}{\pi}} \approx \sqrt{\frac{4 \cdot 2.75 \times 10^{-6}}{3.1416}} \approx 1.87 \times 10^{-3} = \mathbf{1.87 \text{ mm}}$$

Calculo diámetro de garganta Eyector

En la literatura se hace mención al rango óptimo de velocidad de la garganta en un Venturi, el cual está en el rango de 10-30 m/s, y en casos industriales como la aplicación de Venturi Scrubber (eliminación de partículas y gases contaminantes) van en los rangos de 60 hasta 120 m/s, aunque la aplicación no es industrial se encuentra dentro de los parámetros de operación, también se menciona que las eficiencias de transferencia de energía muestran una mayor aceptación en el rango de 60 m/s, por ello se escogió un punto medio entre ambos y se escogió el valor de 35 m/s un valor que está dentro de los parámetros y no se busca caídas de presión tan precipitadas. [14]

Al igual que el cálculo del diámetro de entrada, pero con la variación de que en este punto nuestro Eyector está mezclando ambos gases por lo cual se tendría que calcular el caudal total que pasa por el sistema y sería de la siguiente forma:

$$Q_{tot,s} \approx Q_{LP,s} + Q_{bio,s} = 1.37 \times 10^{-5} + 3.47 \times 10^{-6} \approx \mathbf{1.72 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}$$

Teniendo el Caudal total podemos aplicar la fórmula para la sección de la garganta:

$$A_{garganta} = \frac{Q_{tot,s}}{v_{garganta}}$$

$$A_{garganta} = \frac{1.72 \times 10^{-5}}{35 \text{ m/s}} \approx \mathbf{4.91 \times 10^{-7} \text{ m}^2}$$

Aplicando la formula del cálculo geométrico para el diámetro de un círculo y sustituyendo los valores:

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4}$$

$$D_{garganta} = \sqrt{\frac{4A_{garganta}}{\pi}} \approx 7.91 \times 10^{-4} \text{ m} = \mathbf{0.79 \text{ mm}}$$

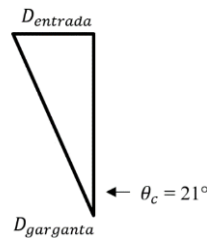
Con los valores calculados del Diámetro de entrada y el diámetro de la garganta podemos determinar la Relación Beta que tiene el Eyector y observar si se encuentra dentro del rango de diseño que se especifica.

$$\beta = \frac{D_1}{D_2} = \frac{1.87}{0.79}$$

$\beta \approx 0.42$ (Se encuentra dentro del parametro de diseño de 0.3 a 0.75)

Cálculo de la Longitud de la Sección Divergente

Para el cálculo de esta sección divergente utilizaremos trigonometría, dividimos la parte de la sección cortando por la mitad para que nos quede un triángulo de la siguiente manera:



El triángulo se divide en cateto adyacente que es la longitud convergente, cateto opuesto que son los radios los cuales los calculamos del diámetro de entrada y diámetro de la garganta y su ángulo de convergencia, de esta manera nos quedaría la siguiente formula:

$$\tan(\theta_c) = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{cateto adyacente}} = \frac{\Delta R_{convergente}}{L_{convergente}}$$

Primero se hace el cálculo de la diferencia de radios:

$$\Delta R_{convergente} = \frac{D_1 - D_2}{2} = \frac{1.87 - 0.79}{2} \text{ mm} = \mathbf{0.54 \text{ mm}} \approx \mathbf{5.4 * 10^{-4} \text{ m}}$$

Despejamos de la formula la longitud de convergencia y nos quedaría de la siguiente manera:

$$\tan(\theta_c) = \frac{\Delta R_{convergente}}{L_{convergente}}, L_{conv} = \frac{\Delta R_c}{\tan(\alpha_c)} = \frac{(D_1 - D_2)/2}{\tan(21^\circ)}$$

Sustituyendo los valores nos daría el siguiente resultado:

$$L_{conv} \approx \frac{5.39 * 10^{-4}}{\tan(21^\circ)} \approx 1.41 * 10^{-3} \text{ m} = \mathbf{1.41 \text{ mm}}$$

Longitud de la Garganta

Siguiendo el principio básico de la geometría que se postula en Bird (Mechanical Engineering Principles) en la cual menciona la igualdad entre el diámetro de la garganta y la longitud de la misma, también en la ISO 5167 [14] y en algunos manuales industriales se hace mención de este parámetro de diseño citando lo siguiente: “Throat length: equal to throat diameter”.

El criterio de escoger la misma dimensión que el diámetro de garganta se fundamenta en que al escoger un valor igual o casi igual se basa en que la presión es más uniforme consiguiendo así una estabilidad en el sistema, si la longitud de la garganta fuera más grande, se generarían perdidas innecesarias ya que el recorrido del fluido es mayor y eso genera que las paredes del mismo eyector porque es el punto en el cual tiene mayor velocidad. Por lo cual se escoge el

siguiente parámetro de diseño:

$$L_{garganta} \approx D_{garganta} \approx \mathbf{0.79 \text{ mm}}$$

Cálculo de la Longitud Convergente y Diámetro de Salida

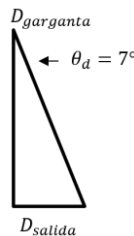
Para el cálculo del diámetro de salida tenemos que fijar una velocidad con la cual saldrá dicho fluido, este parámetro tiene que estar dentro de los que se dictaminan para líneas de uso doméstico, los cuales van de 5 m/s a los 30 m/s. Se escoge el valor mínimo ya que el sistema no requiere demasiada velocidad para su funcionamiento y en promedio las líneas de gas residencial tienen una velocidad de 10 m/s. [14]

En este caso definiendo la Velocidad de salida de 10 m/s nos quedaría la siguiente operación, al igual que el cálculo del diámetro de entrada con la única variante de la velocidad. Primero calculamos el área para después poder calcular el diámetro utilizando la ecuación de continuidad.

$$A_{salida} = \frac{Q_{tot,s}}{v_{salida}} = \frac{1.72 \times 10^{-5}}{10} = \mathbf{1.72 \times 10^{-6} \text{ m}^2}$$

$$D_{salida} = \sqrt{\frac{4A_{salida}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.72 \times 10^{-6}}{\pi}} \approx 1.48 \times 10^{-3} \text{ m} = \mathbf{1.48 \text{ mm}}$$

Para el cálculo de la longitud convergente realizamos los mismos pasos que con la longitud divergente tomando en cuenta que el ángulo es diferente en la salida, en este caso es de 7° y nos quedaría de la siguiente manera:



Cálculo de la diferencia de radios:

$$\Delta R_{divergente} = \frac{D_{salida} - D_{garganta}}{2} = \frac{1.48 - 0.79}{2} \text{ mm} = 0.345 \text{ mm} = \mathbf{3.45 \times 10^{-4} \text{ m}}$$

Expresión de la formula general:

$$L_{divergente} = \frac{\Delta R_{divergente}}{\tan(\theta_d)} = \frac{(D_{salida} - D_{garganta})/2}{\tan 7^\circ}$$

Sustituyendo los valores quedaría de la siguiente manera:

$$L_{divergente} \approx \frac{3.45 \times 10^{-4}}{\tan 7^\circ} \approx 2.81 \times 10^{-3} \text{ m} = \mathbf{2.81 \text{ mm}}$$

De esta manera tenemos todas las dimensiones de la geometría principal del Venturi como se observa en la Tabla 12, pero como en este caso es un Eyector el que se implementara se requiere de la toma de succión por la cual entrada el biogás en baja presión.

Elemento	Símbolo	Valor
Diámetro de entrada	$D_{entrada}$	1.87 mm
Diámetro de garganta	$D_{garganta}$	0.79 mm
Longitud del cono convergente	$L_{convergente}$	1.41 mm
Longitud de la garganta	$L_{garganta}$	0.79 mm
Diámetro de salida	$D_{ssalida}$	1.48 mm
Longitud del difusor	$L_{divergente}$	2.81 mm
Longitud total del Venturi	L_{total}	5.01 mm

Tabla 12. Valores calculados para el diseño del Venturi.

Caída de presión en la garganta del eyector

Un punto muy importante en nuestro eyector es la caída de presión que sufre cuando pasa por la sección de la garganta y es indispensable para el cálculo del diámetro de la toma de succión, ya que es la sección donde nuestro fluido secundario será arrastrado hacia la garganta con ayuda del flujo motriz, para que esto ocurra se necesita de un diseño que este dentro de los

parámetros de operación. La caída de presión que ocurre en la garganta se ve afectada por la presión y velocidad con la cual entra nuestro fluido en la toma de succión y la presión y velocidad que tiene en la garganta, lo cual quiere decir que $\Delta P = P_1 - P_2$, la depresión que existe es la que nos dictamina si existe o no succión del fluido por lo cual se hace uso de la ecuación de Bernoulli general la cual es la siguiente:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g z_2 + h_L$$

(Ecuación de Bernoulli General)

En la formula general nos muestra también una altura z_1 y z_2 las cuales eliminamos ya que el eyector es muy corto y la variación de altura entre la entrada y la garganta es casi nula, y h_L son las perdidas por fricción que sufre el fluido al pasar de una sección 1 a la sección 2 (garganta), como es un sistema con muy pocas perdidas en el transcurso se toma como $h_L = 0$ con la finalidad de que nos quede una depresión ideal, de esta manera nos queda la siguiente ecuación (sin perdidas):

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

(Ecuación de Bernoulli Ideal sin perdidas)

Esta fórmula en pocas palabras no tiene variaciones de altura ni variaciones por perdidas de energía en el eyector, físicamente se describe como la suma de la presión estática más la presión dinámica se conserva entre la entrada de la toma de succión y la garganta.

A partir de esa fórmula podemos calcular la depresión que existe en la garganta, para obtener esa ecuación partimos del termino $\Delta P = P_1 - P_2$, entonces reacomodamos los términos de la ecuación simplificada, pasamos P_2 del lado izquierdo de la ecuación y después factorizamos $\frac{1}{2} \rho v_1^2$ al lado derecho y nos queda la siguiente ecuación:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

De esta manera solo nos queda sustituir los valores anteriormente calculados en la ecuación y determinar la presión con la cual entraría el biogás al eyector, primeramente, conocemos la densidad que predomina en el sistema la cual es la del Gas LP y es de $\rho \approx \rho_{LP} \approx 1.9 \text{ kg/m}^3$ y las velocidades que establecimos fueron $v_{entrada} = 5 \text{ m/s}$ y $v_{garganta} = 35 \text{ m/s}$.

$$\Delta P = \frac{1}{2} (1.9)(35^2 - 5^2)$$

Entonces:

$$\Delta P = 0.5 \times 1.9 \times 1200$$

$$\Delta P = 0.95 \times 1200 \approx \mathbf{1140 \text{ Pa}}$$

Lo que nos quiere decir ese valor es que para que exista una succión del biogás se necesita una depresión de 1140 Pa por encima de la presión atmosférica con el caudal de 0.30 m³/d de entrada del biogás.

Calculo diámetro toma de succión (biogás)

Para el caso del diámetro del orificio de succión conocemos como dato el caudal con el cual entra el biogás, la depresión que sufre en la garganta, el coeficiente de descarga y la densidad del biogás, de esta manera nos basaremos de la ecuación de caudal volumétrico en el orificio de succión de biogás el cual se cita en libros de mecánica de fluidos. [36]

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Producción diaria de biogás	$V_{bio, dia}$	0.3	$m^3/día$
Tiempo por día	-	86400	$s/día$
Caudal másico de biogás	m_{bio}	4.17 $\times 10^{-6}$	kg/s
Densidad del biogás	ρ_{bio}	1.2	kg/m^3
Diferencia de presión disponible	ΔP	1140	Pa
Coeficiente de descarga	C_d	0.8	
Área de la toma de succión	A_s	Por calcular	m^2

Diámetro de la toma de succión	D_s	Por calcular	mm
---------------------------------------	-------	--------------	------

Tabla 13. Datos necesarios para cálculo de orificio de succión.

Para el valor del Coeficiente de Descarga el cual asignamos de 0.8, este valor ajusta el Bernoulli ideal a un valor más cercano al real ya que en el sistema existen pérdidas por fricción, turbulencia y la geometría del Eyector no es perfectamente afilada por lo cual el ajuste de 0.8 proporciona un diseño más real. En la literatura el valor del coeficiente de descarga se encuentra habitualmente en un rango de 0.61 para orificios de placa y 0.80 para orificios de tubería. [36]

De esta manera partimos de la ecuación de caudal volumétrico:

$$\dot{m}_{bio} = C_d A_s \sqrt{2 \rho_{bio} \Delta P}$$

Despejamos el área de la ecuación,

$$A_s = \frac{\dot{m}_{bio}}{C_d \sqrt{2 \rho_{bio} \Delta P}}$$

Sustituyendo los valores de la Tabla 10, nos quedaría de la siguiente manera:

$$A_s = \frac{4.17 \times 10^{-6}}{41.84} \approx \mathbf{9.96 \times 10^{-8} \text{ m}^2}$$

Con el valor del área calculada utilizamos la fórmula de relación del área-diámetro la cual es:

$$A_s = \frac{\pi D_s^2}{4}$$

Despejamos el diámetro de la ecuación:

$$D_s = \sqrt{\frac{4 A_s}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 9.96 \times 10^{-8}}{\pi}} = \sqrt{\frac{3.984 \times 10^{-7}}{\pi}} = \sqrt{1.27 \times 10^{-7}} \approx 3.56 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Pasamos de metros a milímetros y nos quedaría el siguiente resultado del diámetro de la succión:

$$D_s \approx 3.56 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.356 \text{ mm} \approx \mathbf{0.36 \text{ mm}}$$

Con este valor de la toma de succión tenemos todos los valores de diseño del Eyector con los cuales podemos simular en CFD y comparar los valores teóricos contra los valores simulados.

Simulación y Comprobación de Funcionamiento en SolidWorks

En este apartado se hará la comprobación del diseño del Eyector en base a los cálculos obtenidos anteriormente, la finalidad de esta simulación es observar el comportamiento que presenta el Eyector en una prueba que está más cerca de la realidad y con ello verificar que el funcionamiento del sistema es adecuado para su implementación comparando los valores que resultan de la simulación y los valores que se calcularon.

Basándonos en los resultados obtenidos en la Tabla 9, se hizo el croquis de la geometría principal del Venturi en SolidWorks como se muestra en la Figura 4, el cual en SolidWorks nos queda completamente definido, por lo cual las medidas coinciden con las medidas calculadas en la Tabla 12.

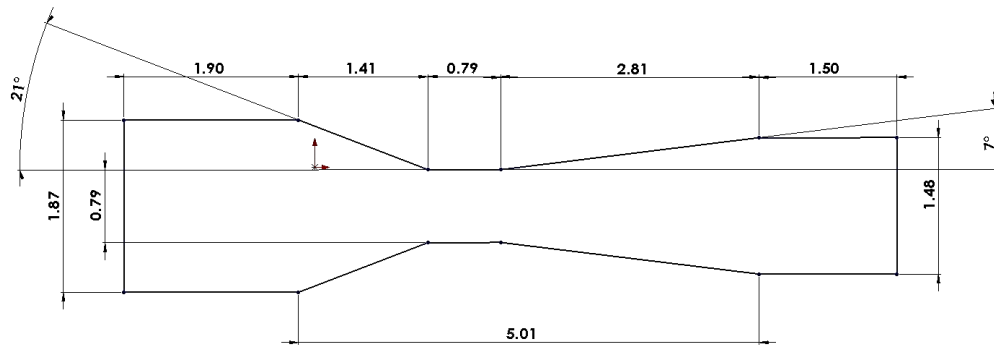


Figura 4. Croquis del Venturi sin toma de succión.

Para lograr un sólido del Venturi, se usó la herramienta de Revolución para así obtener un sólido y de esta manera realizarle pruebas de simulación con Flow Simulation la herramienta destinada para pruebas de este tipo en SolidWorks.

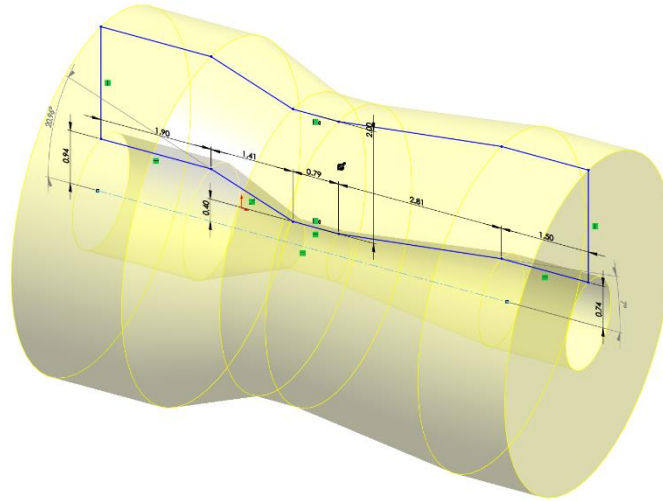


Figura 5. Modelo solido del Venturi en SolidWorks.

De esta manera nos quedaría el siguiente modelo en su forma solida en SolidWorks con las medidas de la Tabla 9.

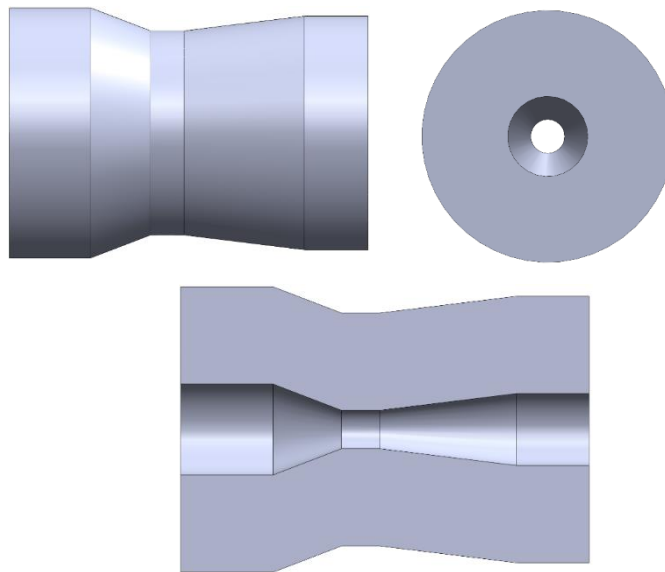


Figura 6. Modelo solido en vista frontal, vista derecha y vista frontal con un corte longitudinal.

Como siguiente paso se diseñó la toma de succión con las medidas calculadas anteriormente, la cual fue de 0.36 mm, en este punto nuestro dispositivo paso de ser un Venturi clásico a ser un Eyector para succión de fluidos con un flujo motriz.

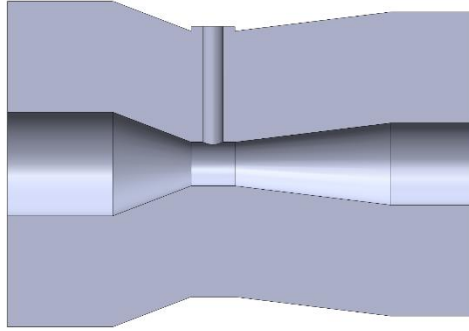


Figura 7. Diseño Eyector en SolidWorks.

En este paso ya tenemos completamente definido el diseño del Eyector, preparado para poder realizarle pruebas de simulación y comprobar su eficacia.

Para la simulación utilizamos la herramienta de Wizard en la cual elegimos los parámetros iniciales del sistema como presión, la composición de los gases que pasaran por el Eyector, el tipo de flujo, etc. Primero escogemos el nombre de la simulación que realizaremos, en este caso lo nombramos como “Eyector”.

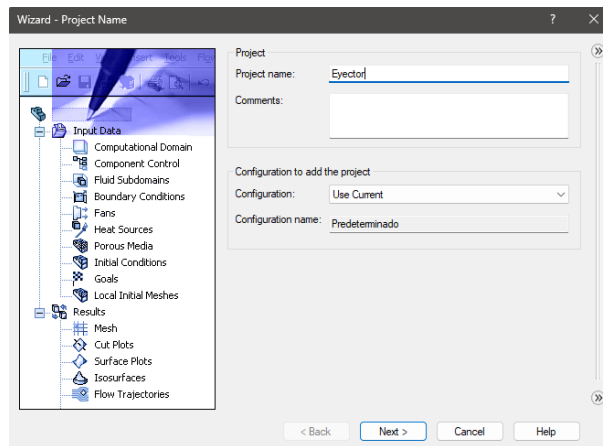


Figura 8. Nombre del proyecto en Wizard.

Para las unidades que utilizaremos, lo dejaremos en el Sistema internacional (SI) con el fin de ser más precisos con las unidades de medida.

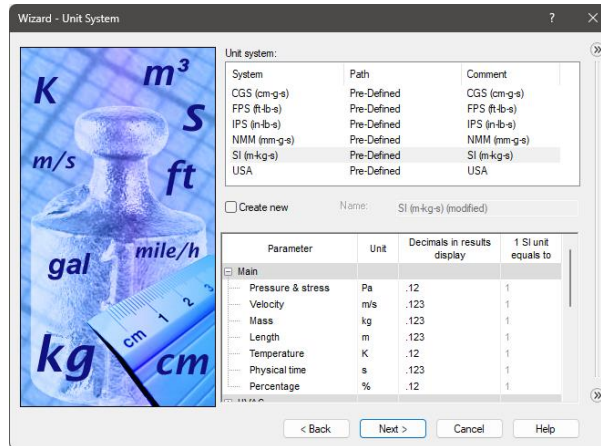


Figura 9. Unidades del sistema.

Para el tipo de análisis, se están evaluando los gases que entraran al sistema, por lo cual se eligió como característica física el flujo de fluido y para el tipo de análisis como es un sistema cerrado queremos evaluar lo que sucede dentro de él, de esta manera elegimos el tipo de análisis interno.

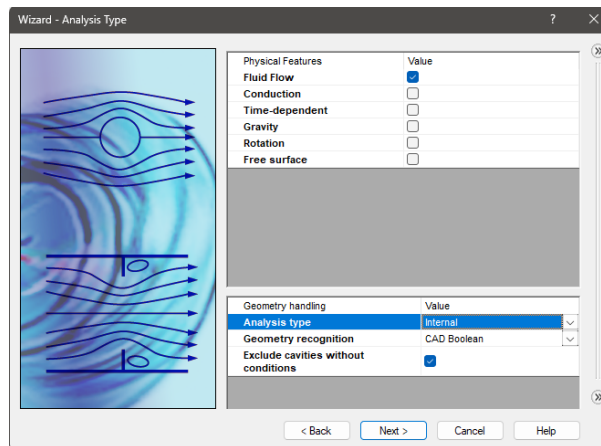


Figura 10. Tipo de análisis.

En el apartado de fluido predeterminado establecimos la composición del Gas LP y del biogás, esto nos ayudara a obtener valores lo más cercanos a la realidad y poder compararlos con los resultados obtenidos de los cálculos de diseño y operación. En este caso para la composición del Gas LP se seleccionó los gases butano y propano, para el caso del biogás se seleccionó los gases metano y dióxido de carbono.

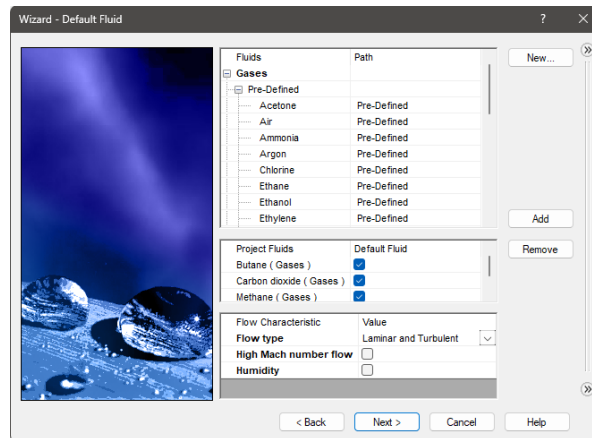


Figura 11. Fluido predeterminado para el sistema.

De esta manera tenemos completamente definido los parámetros iniciales de simulación, y solo nos quedaría definir las condiciones de frontera en el sistema, para ello nos basamos de la composición de cada uno de los gases y de los resultados obtenidos en los cálculos. En el caso de la entrada del eyector se definió el valor de $m_{LP(conbiogas)} = 2.45 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$, el cual calculamos anteriormente para saber cuánto gas LP requiere ser suministrado con el caudal $0.30 \text{ m}^3/\text{d}$ del biogás. Para ello fijamos el valor como condición de frontera y al ser un caudal masico con flujo en dirección positiva, se elige el apartado Inlet Mass Flow. Ver Figura 12

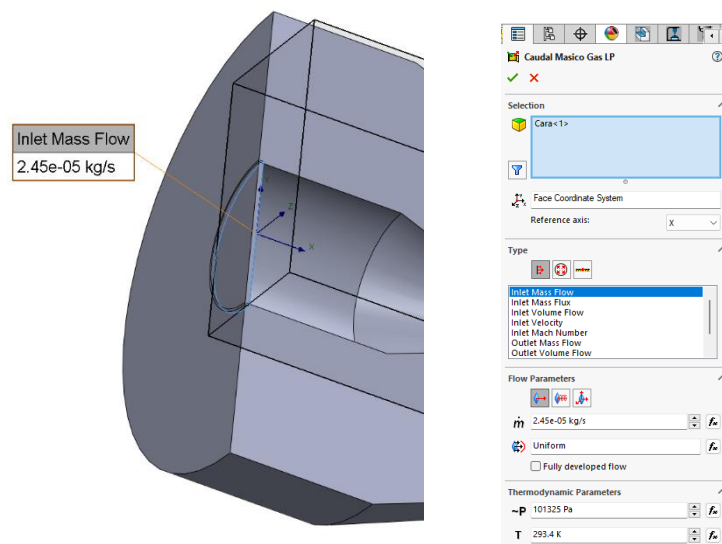


Figura 12. Condición de frontera para la entrada del Eyector (Gas LP).

Para el caso del biogás, la condición de frontera que elegimos como parámetro de entrada fue el caudal masico, el cual tiene el valor de $\dot{m}_{bio} = 4.17 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$, también al ser un flujo masico se escoge Inlet Mass Flow.

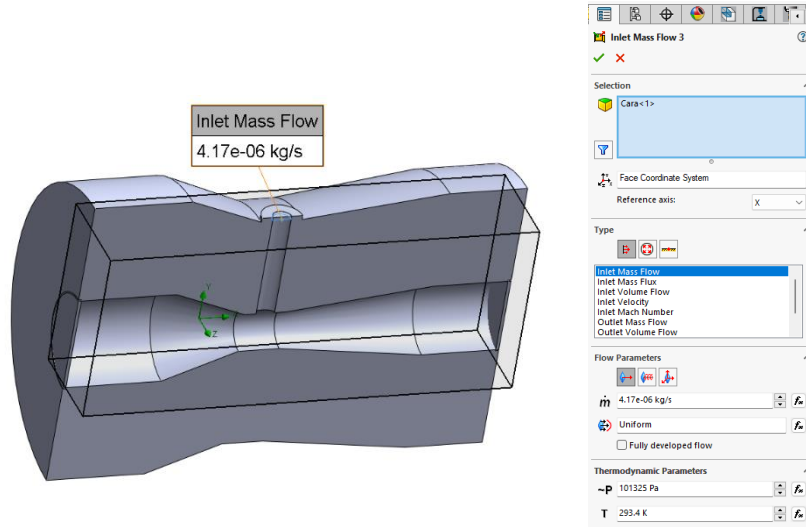


Figura 13. Condición de Frontera para la toma de succión del Eyector (Biogás).

Con las condiciones de frontera asignadas se puede proceder a realizar la simulación y con ello comparar los resultados teóricos vs resultados del CFD, en este caso para poder monitorear estas variables del sistema, SolidWorks tiene un apartado llamado “Goals” el cual nos servirá para obtener dichos valores.

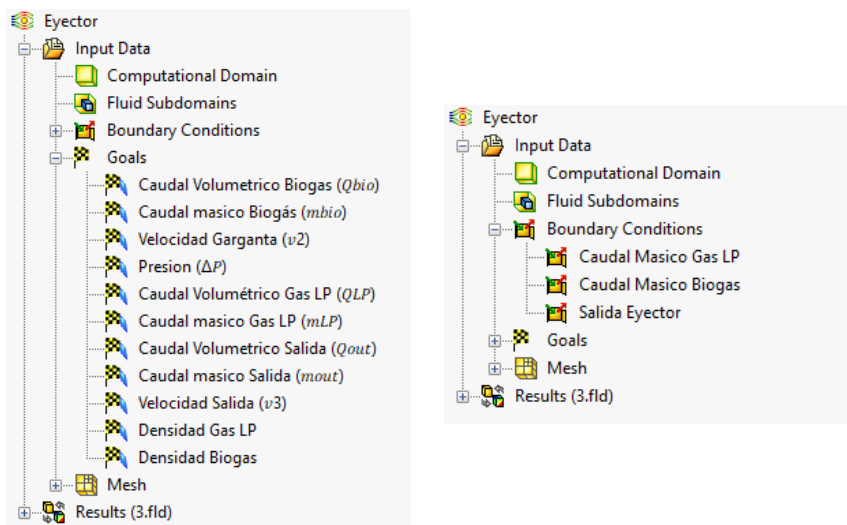


Figura 14. Selección de Variables “Goals” y condiciones de frontera en SolidWorks.

Con las variables ya asignadas las cuales se muestran en la Figura 14, podemos ejecutar la simulación y observar los resultados que nos genera SolidWorks. Teniendo en cuenta que al ser una simulación 3D esta se asemeja más a la practica en la cual existen perdidas de energía en el transcurso de todo el sistema por lo cual los valores que muestre SolidWorks pueden variar muy poco a comparación con los valores teóricos.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
Caudal Volumétrico Biogas (Q_{bio})	[m ³ /s]	3.4365e-06	3.4372e-06	3.4354e-06	3.4379e-06	100
Caudal masico Biogas ($\dot{m}_{bio}$)	[kg/s]	4.1700e-06	4.1700e-06	4.1700e-06	4.1700e-06	100
Velocidad Garganta (v_2)	[m/s]	34.771	34.778	34.760	34.785	100
Presion (ΔP)	[Pa]	102411.12	102377.66	102357.86	102417.75	100
Caudal Volumétrico Gas LP (Q_{LP})	[m ³ /s]	1.2737e-05	1.2740e-05	1.2733e-05	1.2742e-05	100
Caudal masico Gas LP ($\dot{m}_{LP}$)	[kg/s]	2.4500e-05	2.4500e-05	2.4500e-05	2.4500e-05	100
Caudal Volumétrico Salida (Q_{out})	[m ³ /s]	-1.6421e-05	-1.6419e-05	-1.6520e-05	-1.6389e-05	100
Caudal masico Salida ($\dot{m}_{out}$)	[kg/s]	-2.8670e-05	-2.8670e-05	-2.8670e-05	-2.8670e-05	100
Velocidad Salida (v_3)	[m/s]	11.720	11.418	11.081	11.720	100
Densidad Gas LP	[kg/m ³]	1.92	1.92	1.92	1.92	100
Densidad Biogas	[kg/m ³]	1.21	1.21	1.21	1.21	100

Figura 15. Resultados de la Simulación del eyector.

De esta manera hicimos una tabla comparativa de los valores teóricos y los valores de la simulación y de esta manera observar si se encuentran dentro del rango para su funcionamiento, también con estos valores podemos comprobar la efectividad del eyector y su comportamiento.

Magnitud	Símbolo	Teórico	CFD (Promedio)
Caudal volumétrico biogás	Q_{bio}	3.47222E-06	3.43719E-06
Caudal másico biogás	$\dot{m}_{bio}$	4.16667E-06	4.17000E-06
Caudal volumétrico Gas LP	Q	1.28947E-05	1.27398E-05
Caudal másico Gas LP (BC)	$\dot{m}_{LP}$	2.45000E-05	2.45000E-05
Caudal volumétrico total a la salida	Q	1.63670E-05	1.64193E-05
Caudal másico total a la salida	$\dot{m}_{salida}$	2.86667E-05	2.86701E-05
Velocidad en garganta	$v_{garganta}$	3.50000E+01	3.47780E+01
Velocidad a la salida	v_{salida}	1.00000E+01	1.14177E+01
ΔP en garganta (Bernoulli)	ΔP	1.14000E+03	1.05266E+03
Densidad Gas LP	ρ_{LP}	1.90000E+00	1.92310E+00
Densidad biogás	ρ_{bio}	1.20000E+00	1.21320E+00

Tabla 14. Comparativa entre los valores teóricos y los valores de la simulación CFD.

Criterios de validación del modelo CFD

Una manera de identificar que el Eyector funciona de manera correcta es en base al aumento de la energía cinética por el aumento precipitado de la velocidad en la garganta del eyector y la disminución de la presión en el mismo punto, reestableciéndose los valores de presión y velocidad en la sección divergente o del difusor. Para poder conocer las gráficas de velocidad y presión que presenta el eyector tenemos que dibujar una línea en las coordenadas de “X” para de esta manera observar cómo se comporta en todo el trayecto de la longitud total del Eyector.

Para ello creamos una línea que pase por la entrada en el punto medio del diámetro, hasta la parte final del eyector de igual manera en el punto medio del diámetro de la salida como se muestra en la Figura 16.

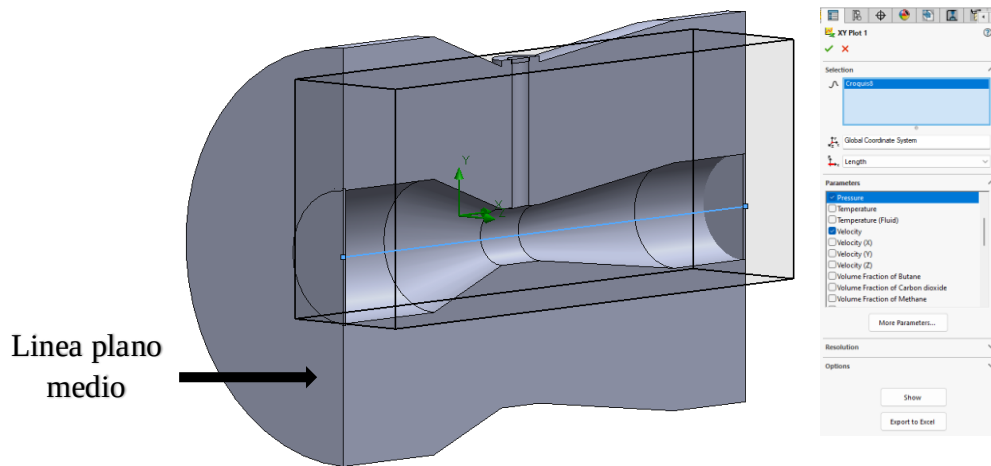
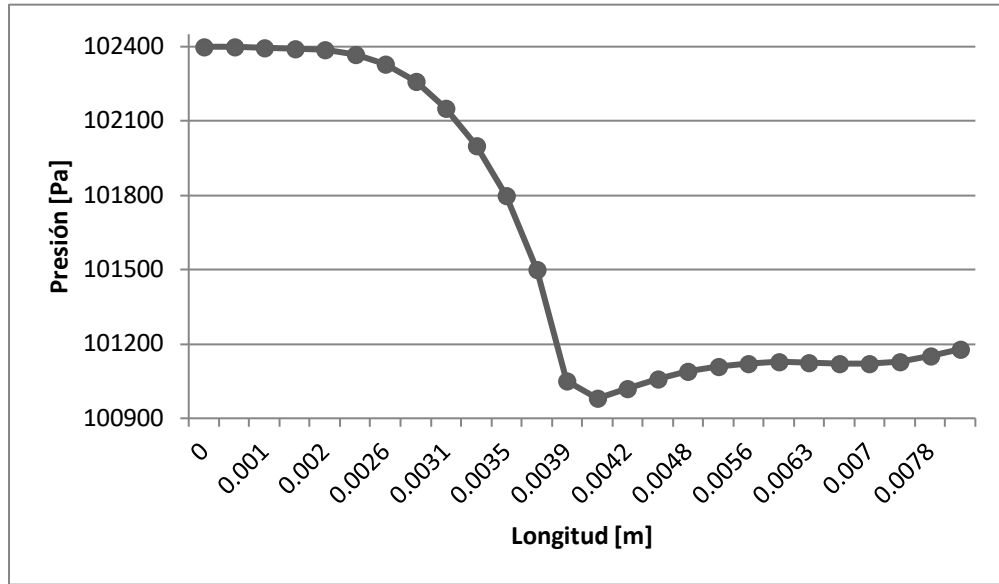


Figura 16. XY Plot a lo largo del eje.

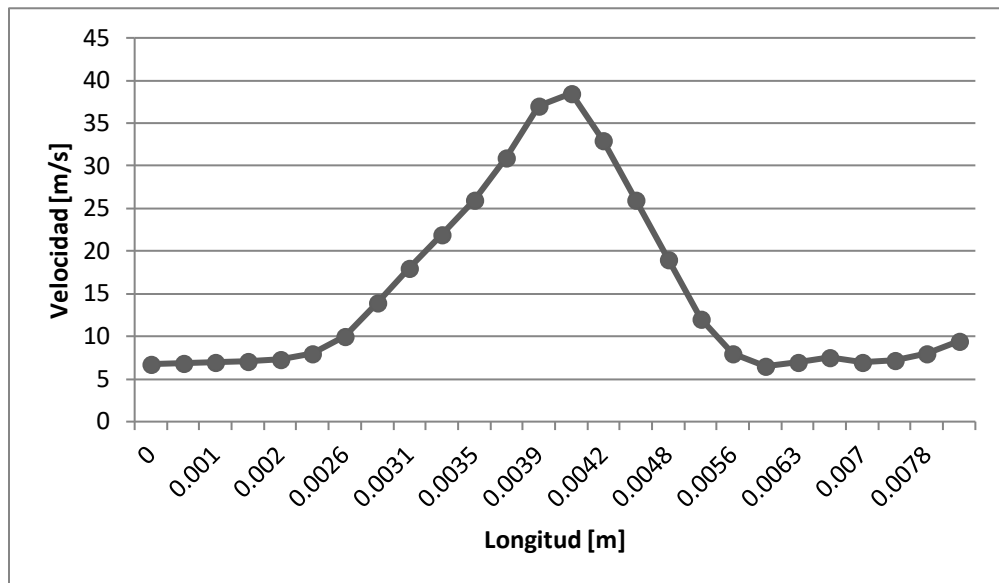
Con esta línea que creamos como eje de referencia para poder usar la herramienta de XY plot que tiene Solidworks la cual nos muestra el cambio de las variables de la presión y velocidad a lo largo de la longitud del eyector como se muestra en la Figura 16, los valores que nos muestra la simulacion fueron los siguientes:

		Longitud [m]	Velocidad [m/s]	Presión [Pa]
		0	6.8	102400
		0.0005	6.9	102398
		0.001	7	102395
		0.0015	7.1	102392
		0.002	7.3	102388
		0.0023	8	102370
		0.0026	10	102330
		0.0029	14	102260
		0.0031	18	102150
		0.0033	22	102000
		0.0035	26	101800
		0.0037	31	101500
		0.0039	37	101050
Punto medio (garganta)	→	0.004	38.5	100980
		0.0042	33	101020
		0.0045	26	101060
		0.0048	19	101090
		0.0052	12	101110
		0.0056	8	101120
		0.006	6.5	101130
		0.0063	7	101125
		0.0066	7.5	101120
		0.007	7	101120
		0.0074	7.2	101130
		0.0078	8	101150
		0.0082	9.5	101180

Tabla 15. Resultados de la trayectoria del flujo de la presión y velocidad.



Grafica 2. Trayectoria de la presión en el Eyector.



Grafica 3. Trayectoria de la velocidad en el Eyector.

Perfiles de presión y velocidad a lo largo del eje del eyector

Las Gráficas 2 y 3 muestran los perfiles obtenidos en Solidworks Flow Simulation a lo largo de la línea que trazamos en toda la longitud del eyector, desde la entrada del gas LP hasta su recuperación en el difusor con una longitud aproximada de 0 a 8.2 mm, sobre esta línea se registraron los valores que se muestran en la tabla 12.

Comportamiento de la presión estática

En la tabla 12 se aprecia que, de 0 a 0.0023 m la presión es prácticamente constante sin variaciones considerables, manteniendo un valor de presión de 102,400 Pa ya que esta zona representa la entrada del eyector con muy pocas variaciones en su velocidad y la energía mecánica se encuentra mayormente en estado de presión estática y su velocidad es muy baja.

A partir de los 0.0026 m la presión comienza a tener una caída considerable hasta un punto mínimo en entorno a los 0.004 m, esta zona o sección del eyector coincide con el tramo convergente y la garganta, al reducir su diámetro la presión tiende a bajar de manera rápida de acuerdo con la ecuación de Bernoulli la cual se traduce en la disminución de la presión estática llegando a un punto mínimo en la garganta.

Esta caída de presión es la que encargada de generar esa succión necesaria para que el flujo de biogás sea arrastrado hasta la sección de la garganta y pueda combinarse con el flujo motriz, de tal manera que dicha presión sea inferior a la presión con la cual entra el biogás a la toma de succión.

Por último, entre los valores de 0.0042 m hasta la salida de 0.0082 m la presión comienza a recuperarse de manera parcial regresando a una presión cercana a la presión atmosférica alrededor de los 101,180 Pa.

Comportamiento de la velocidad

De la misma manera que la presión, la velocidad se mantiene en un rango de 6-7 m/s entre los valores de 0 a 0.0023 m lo cual es normal por el caudal de entrada del gas LP que asignamos y el diámetro de entrada.

En el rango de los 0.0026 a los 0.004 ocurre un cambio en los valores de la velocidad contrario a la presión, la velocidad aumenta de manera progresiva mientras pasa por la sección convergente y la garganta, lo cual obliga a acelerar el gas para conservar ese caudal, alcanzando un valor máximo cercano a los 39 m/s en teoría a la mitad del eyector lo cual es un punto que valida el principio del efecto Venturi, también esto concuerda con el valor teórico que

asignamos de 35 m/s para el diseño, considerando que la simulación de CFD se incluyen pérdidas, turbulencias u otros efectos.

En los rangos de 0.0042-0.0082 la velocidad va disminuyendo de manera progresiva hasta llegar a un rango de 9-10 m/s que se mantienen estables por la recuperación del diámetro de la tubería, lo cual comparándolo con el valor teórico asignado de 10 m/s se encuentra son casi iguales.

Con esto podemos determinar un principio básico de operación del Venturi el cual muestra la relación inversa que tiene la presión y velocidad de un fluido, donde un fluido que pasa por un estrechamiento del diámetro la velocidad aumentará y la presión disminuirá de igual manera como se muestra en la Grafica 2 y 3, este comportamiento es consistente con el principio de la ecuación de Bernoulli, por lo cual el funcionamiento del eyector es consistente y con pérdidas menores en su funcionamiento.

Líneas de flujo del gas LP y biogás en CFD

Las líneas de flujo es otra manera de observar el comportamiento del fluido dentro de un sistema que puede ser abierto o cerrado, y la dirección con la cual recorre el fluido de un punto a otro.

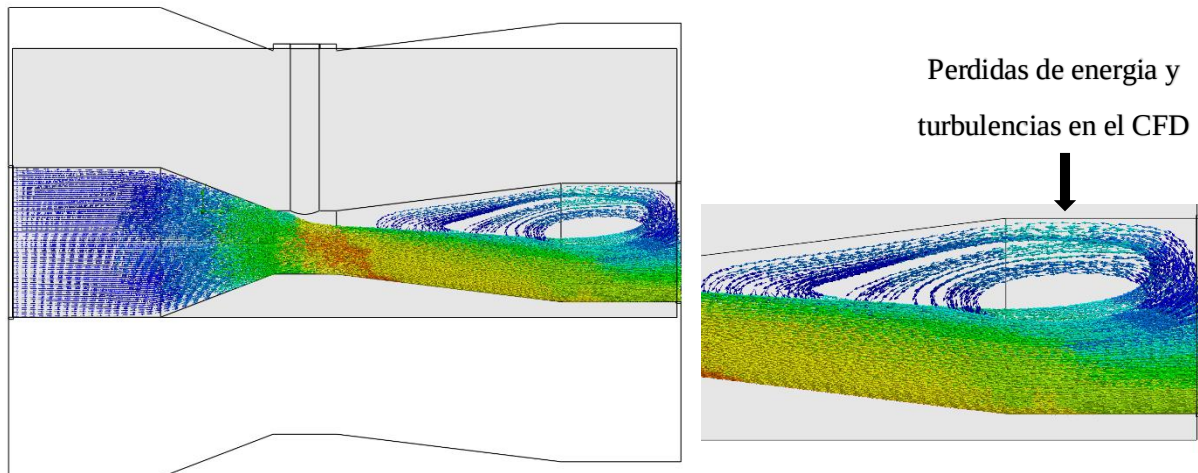


Figura 17. Líneas de flujo del gas LP

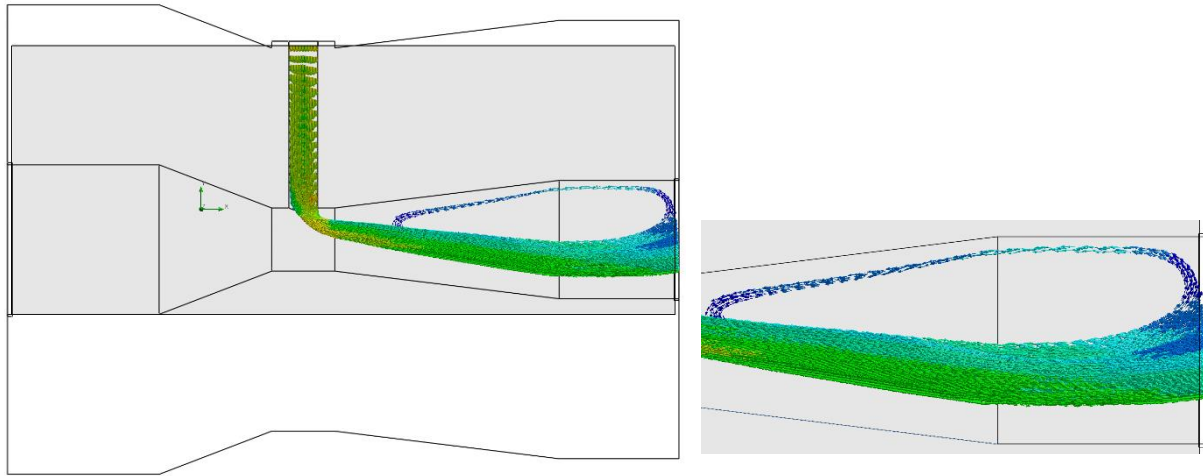


Figura 18. Líneas de flujo del biogás

Con esta trayectoria de flujo que tiene el gas LP y el biogás podemos determinar de manera visual que existe una mezcla entre ambos gases y presentan pérdidas mínimas por turbulencias u otros efectos de diseño, lo cual entra dentro de los parámetros y los valores están muy cercanos a los teóricos como se muestra en la tabla 11.

También la dirección que nos muestra en las líneas de flujo tanto en la entrada del eyector como en la toma de succión son positivas y existe un arrastre del biogás hasta la garganta del eyector lo cual demuestra que el flujo del biogás con un caudal de $3.47 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ puede ser succionado por un caudal de gas LP de $1.37 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

Cut Plots del gas LP y biogás

Con esta herramienta de Flow Simulation podemos ver los puntos máximos y mínimos de la presión y de la velocidad, lo cual nos da una visión aún más clara del comportamiento del flujo.

Los Cut plots de presión y velocidad muestran de manera clara el comportamiento del efecto Venturi, en el caso de la garganta podemos observar que es donde ocurre la presión mínima y la velocidad máxima en el eyector, en dicho punto el sistema alcanza una velocidad máxima de 48 m/s como se observa en la Figura 20, fue un mínimo el cual está dentro del rango permisible en un eyector, y la presión mínima también ocurre en la sección de la garganta registrando un mínimo de 100716 Pa como se muestra en la figura 19 lo cual también reafirma la depresión

que existe en ese punto.

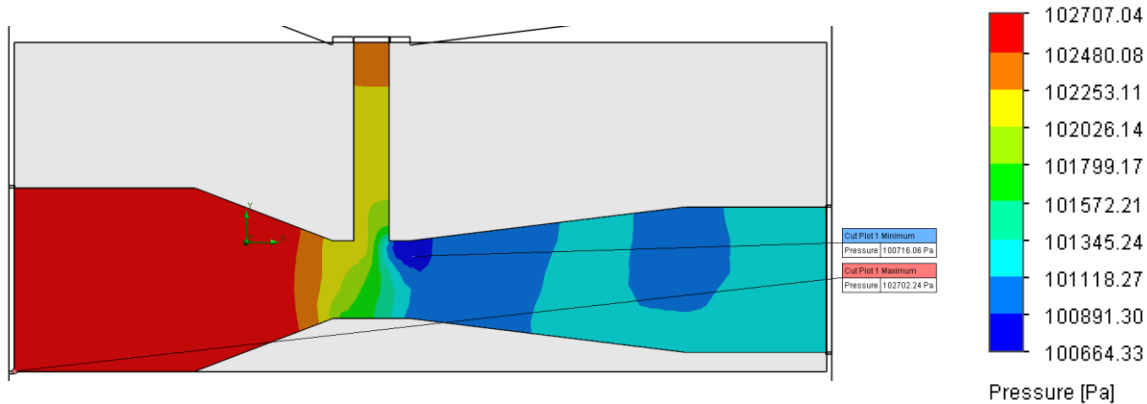


Figura 19. Cut plot de la presión del eyector

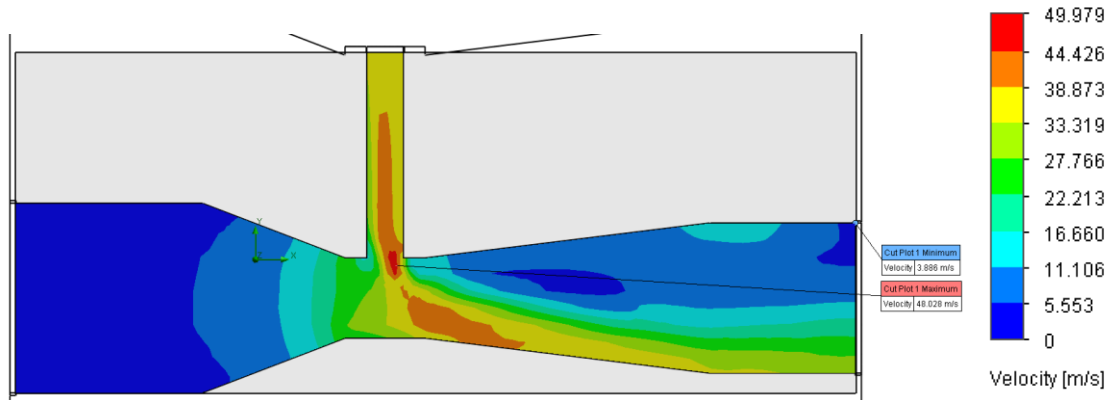


Figura 20. Cut plot de la velocidad del eyector

Conclusión General del Diseño del Eyector

En esta tesis se diseñó y evaluó la propuesta de un eyector como alternativa para la eliminación de tanques de almacenamiento que constituyen de manera general a un biodigestor casero con la principal finalidad de poder ser implementados en zonas urbanas donde el espacio es reducido en comparación con las zonas rurales. De esta manera se evaluó la alternativa de utilizar un flujo motriz como gas principal de consumo y bajo el principio de balances de energía, continuidad y criterios geométricos de diseño, se pudo diseñar y simular una geometría de un eyector capaz de generar una succión del biogás disponible de un biodigestor a baja presión alcanzando velocidades de un promedio de 35-40 m/s, los cuales son suficientes para poder arrastrar el caudal del biogás hasta la garganta.

Los cálculos teóricos nos mostraron que existe una aportación del biogás de 6% para un quemador pequeño de 1.2kW, aunque es una pequeña porción pequeña para la disminución de la utilización de gases como lo es el gas LP, es una manera de reducir la emisión de gases por la descomposición de la materia orgánica, de esta manera la utilizaríamos como potencial termino implementando biodigestores pequeños y al mismo tiempo reduciríamos considerablemente la emisión de gases de efecto invernadero.

La simulación en SolidWorks nos ayuda a validar los resultados teóricos, poniendo en prueba el diseño en un simulador 3D lo cual nos da valores más cercanos a la realidad y se pudo obtener unos valores muy cercanos a los que se calcularon como se muestra en la tabla 11, las variantes de la presión, los caudales y las velocidades mostraron valores aunque no iguales a los teóricos fueron muy parecidos por el hecho que los cálculos teóricos son de un Bernoulli ideal el cual no se consideran perdidas por fricción o turbulencias, el CFD muestra valores que serían reales si se implementara con las condiciones que se asignaron al eyector.

En teoría y apoyados por una simulación CFD se puede demostrar que el eyector es viable para su aplicación en un entorno urbano, para poder mezclar un gas principal con biogás bajo disponibilidad, el diseño muestra mejoras en la reducción de gas LP y aunque la reducción del consumo de gases que afectan al planeta en conjunto y teniendo un plan de implementación de biodigestores a baja presión con eyectores como alternativas para un consumo urbano, podría generar un gran impacto en la disminución de gases de efecto invernadero.

Referencias

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2023: Synthesis Report (AR6 SYR) – Longer Report,” IPCC, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.
2. IPCC, “Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (AR6 WGIII), Chapter 12: Cross-sectoral perspectives,” IPCC, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/chapter-12/>.
3. S. Kaza, L. C. Yao, P. Bhada-Tata y F. Van Woerden, “What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050,” World Bank, Washington, DC, EE.UU., 2018. [En línea]. Disponible en: <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>
4. S. Harirchi, S. Wainaina, T. Sar, S. A. Nojoumi, M. Parchami, M. Parchami, S. Varjani, S. K. Khanal, J. Wong y M. J. Taherzadeh, "Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review," *Bioengineered*, vol. 13, n.º 3, pp. 6521–6557, feb. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8973982/>
5. M. J. B. Kabeyi y O. A. Olanrewaju, “Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition,” *Journal of Energy*, vol. 2022, art. 8750221, 43 p., 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2022/8750221>
6. Green Empowerment, “Tubular Biogas Digester Technician Training – Biogas Manual Training Presentation,” presentación en diapositivas, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://greenempowerment.org/wp-content/uploads/2021/04/Biogas-Manual-Training-Presentation.pptx>
7. Environmental and Energy Study Institute (EESI), “Biogas: Converting Waste to Energy – Fact Sheet,” 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-biogasconverting-waste-to-energy>
8. J. L. Magaña R., E. Torres, M. T. Martínez G. y R. Hernández Cantero, “Producción de biogás a nivel laboratorio utilizando estiércol de cabras,” *Acta Universitaria*, vol. 16, n.º 2, pp. 27–37, 2006. [En línea]. Disponible en: <https://www.actauniversitaria.ugto.mx/index.php/acta/article/view/185>
9. G. Moncayo Romero, “¿Qué es el biogás?,” Aqualimpia Engineering e.K., Uelzen,

- Alemania, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://s51d157330f7b08ca.jimcontent.com/download/version/1505441029/module/14489637722/name/QUE-ES-EL-BIOGAS.pdf>
10. Instituto de Energía UNCUIYO – Programa de Biogás, Biodigestor. Manual de uso. [En línea]. Disponible en: <https://imd.uncuyo.edu.ar/upload/manual-uso-biodigestor.pdf>.
 11. I. Budiman, “The Role of Fixed-Dome and Floating Drum Biogas Digester for Energy Security in Indonesia,” *Indonesian Journal of Energy*, vol. 3, n.º 2, pp. 83–93, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://ije-pyc.org/IJE/article/view/88>
 12. FED s.r.l., “Design Features and Operation of Jet Ejectors,” 000-DVP-EN-171102, s.f. [En línea]. Disponible en: <https://www.fed.it/images/news/15Feb2017/000-DVP-EN-140312.pdf>
 13. R. L. Mott, *Mecánica de fluidos*, 6.ª ed. Ciudad de México, México: Pearson Educación, 2006.
 14. ISO, ISO 5167-4:2003, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — Part 4: Venturi tubes. Ginebra, Suiza: International Organization for Standardization, 2003. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/03/01/30192.html>
 15. B. X. An, T. R. Preston y F. Dolberg, “The introduction of low-cost polyethylene tube biodigesters on small scale farms in Vietnam,” *Livestock Research for Rural Development*, vol. 9, n.º 2, 1997. [En línea]. Disponible en: <https://www.lrrd.org/lrrd9/2/an92.htm>
 16. J. Martí-Herrero, M. Chipana, C. Cuevas, G. Paco, V. Serrano, B. Zymla, K. Heising, J. Sologuren y A. Gamarra, “Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia,” *Renewable Energy*, vol. 71, pp. 156–165, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.036>
 17. J. Ramaswamy y P. S. Vemareddy, “Production of biogas using small-scale plug flow reactor and sizing calculation for biodegradable solid waste,” *Renewables: Wind, Water, and Solar*, vol. 2, art. 6, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/81818433.pdf>
 18. K. C. Oibileke, S. Mamphweli, E. L. Meyer, G. Makaka y N. Nwokolo, “Design and Fabrication of a Plastic Biogas Digester for the Production of Biogas from Cow Dung,”

- Journal of Engineering, vol. 2020, art. 1848714, 11 p., 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2020/1848714>
19. J. N. Mungwe, D. A. Asoh y E. M. Mbinkar, “Design Considerations of a Flexible Biogas Digester System for Use in Rural Communities of Developing Countries,” *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, vol. 11, n.º 4, pp. 260–271, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.4236/jsbs.2021.114016>
 20. S. J. Almalowi y F. A. Jobran, “Experimental Study of Design and Implementation of Small-Scale Biogas Digest System,” *Energy and Power Engineering*, vol. 14, n.º 3, pp. 156–165, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.4236/epe.2022.143008>
 21. C. Vivallos Soto, F. Ruiz Bertín, C. Robles Calderón, M. V. Larionov, P. J. Arias Ordóñez y I. Cevallos Baque, “Biodigestion System Made of Polyethylene and Polystyrene Insulator for Dog Farm (on the Example of the Republic of Chile),” *Life*, vol. 12, n.º 12, art. 2039, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/life12122039>
 22. F. Makamure, P. Mukumba y G. Makaka, “Biogas Production from a Solar-Heated Temperature-Controlled Biogas Digester,” *Sustainability*, vol. 16, n.º 22, art. 9894, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su16229894>
 23. M. Issahaku, N. S. A. Derkyi y F. Kemausuor, “A systematic review of the design considerations for the operation and maintenance of small-scale biogas digesters,” *Heliyon*, vol. 10, n.º 2, art. e24019, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24019>
 24. Y. C. Alvarez-Buendia, R. Jiménez-Borges, A. Aponte-Risco y R. L. Solís-Tovar, “Design Improvements and Best Practices in Small-Scale Biogas Plants: A Case Study in the Chillon Valley, Perú,” *Energies*, vol. 18, n.º 2, art. 338, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en18020338>
 25. R. A. Abubakar, “Biogas production using conventional plastic water tank digester,” *Clean Energy Science and Technology*, vol. 3, n.º 1, art. 269, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.18686/cest269>
 26. Y. O. El Gammal, H. M. El-Sheikh y S. S. E. Ahmad, “Architectural design adaptation of Egyptian residential buildings to accommodate digesters of biogas from food waste,” *Scientific Reports*, vol. 15, n.º 1, art. 8449, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90359-8>

27. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Bioenergy and Food Security: The BEFS Analytical Framework, Environment and Natural Resources Management Series, n.º 16. Roma, Italia: FAO, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/4/i1968e/i1968e.pdf>
28. M. D. Reader-Harris, Orifice Plates and Venturi Tubes. Cham, Suiza: Springer International Publishing, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-16880-7>.
29. Fang, J. Ou, X. Chen y S. A. Miedema, “Study of slurry transport characteristics in a jet pump,” Terra et Aqua, n.º 172, pp. 6–19, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iadc-dredging.com/article/study-of-slurry-transport-characteristics-in-a-jet-pump/>
30. Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS), “El consumo de gas de los artefactos,” ENARGAS, Argentina, s.f. [En línea]. Disponible en: <https://www.enargas.gob.ar/secciones/eficiencia-energetica/consumo-artefactos.php>.
31. MetroGAS S.A., “Ahorra Gas – Consumo de los artefactos,” MetroGAS, Argentina, s.f. [En línea]. Disponible en: <https://www.metrogas.com.ar/informacion-util/ahorra-gas/>
32. R. W. Miller, Flow Measurement Engineering Handbook, 3.ª ed., Nueva York, NY, EE. UU.: McGraw-Hill, 1996.
33. Bosch Termotecnia, “Calentadores de gas Therm 5700S – Documentación técnica (modelo 6721841255),” 2022. [En línea]. Disponible en: <https://bosch-es-es-c.boschtt-documents.com/download/file/file/6721841255.pdf>
34. M. A. Jara Balbontín, “Conversión de GLP: m³ a kg y litros,” Scribd, s.f. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/524422811/Tabla-conversion-Gas>
35. UNFCCC, “Specific biogas generation per unit of digester volume,” Annex 10, SSC WG 36th Meeting Report, 2012. [En línea]. Disponible en: https://cdm.unfccc.int/Panels/ssc_wg/meetings/036/ssc_036_an10.pdf
36. A. J. McLemore, J. S. Tyner, D. C. Yoder y J. R. Buchanan, “Discharge Coefficients for Orifices Cut into Round Pipes,” Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 139, n.º 11, pp. 947–954, 2013. [En línea]. Disponible en: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000641](http://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000641)
37. Crane Co., Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe. Technical Paper No. 410, 2013. Stamford, CT, EE. UU.: Crane Co.