

Diseño conceptual del aprovechamiento energético del biogás

Christian Ernesto Aguilar Ramírez

Trabajo de Grado para Optar al título de Ingeniero Electricista

Director

Iván David Serna Suarez

Doctor en ingeniería – Área Ingeniería Eléctrica

Codirectora

Liliana del Pilar Castro Molano

Doctora en ingeniería – Área Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A ti, amada madre, con todo mi amor y mi gratitud. Eres la raíz de todo lo que soy y la razón por la que hoy alcanzo esta meta. Gracias por tu infinito sacrificio, tu fuerza incansable y tu amor sin medida. No hay palabras que puedan abarcar lo mucho que te amo.

A mi adorada hermana Andrea Aguilar Ramírez, compañera de vida y luz en los días oscuros. Tu constante apoyo y alegría han sido bálsamo para mi alma. Gracias por estar siempre y por creer en mí incluso cuando yo dudaba.

A mis hermanos Camilo, Giovanni y Edwin. Pilares firmes en mi camino. Su presencia ha sido refugio, su ejemplo, inspiración, y su cariño, impulso. Estoy profundamente agradecido por compartir con ustedes la sangre y la vida.

A mi amigo del alma, Marlon Esparza, mi hermano elegido por el corazón. En mis momentos de duda, estuviste ahí con silencio, con risa o con palabra oportuna. Gracias por tu lealtad, y por caminar a mi lado. Tu amistad ha sido un tesoro invaluable a lo largo de este viaje.

A Brayan Tarazona, mi amigo leal, siempre dispuesto a tender la mano y compartir el camino. Gracias por tus palabras, por tu tiempo y tu fe en mí.

A mi nona María, quien con sus oraciones tejió un manto de protección y esperanza sobre mi vida. Gracias por creer desde la fe cuando yo aún dudaba desde la razón.

A mi padre Ernesto Aguilar, con respeto y reconocimiento, gracias por ser parte de mi historia. Honro lo que heredé de ti y lo llevo conmigo con gratitud.

A mis demás amigos y familiares, aquellos que han estado cerca con sus risas, sus consejos y su compañía. Cada uno ha dejado huella en mi corazón y en este logro.

Christian Ernesto Aguilar Ramírez

Agradecimientos

A Dios, porque en su infinito amor y bondad ha acompañado cada momento de mi vida, manteniéndome con fortaleza y esperanzado en que toda obra para bien.

A mi estimado director Iván David Serna Suarez y codirectora Liliana del Pilar Castro Molano por su compañía y orientación en el desarrollo de este proyecto de grado.

A todos los profesores de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones Uis, quienes a través de su vocación y conocimiento formaron al estudiante que hoy culmina esta etapa.

A la gloriosa Universidad Industrial de Santander por brindarme la oportunidad de formarme como profesional.

Christian Ernesto Aguilar Ramírez

Tabla de contenido

	Pag
Introducción	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Generalidades.....	14
2.1 Condiciones de la granja.....	17
3. Tecnologías para el aprovechamiento de biogás	18
3.1 Motores reciprocantes de combustión interna.	20
3.2 Turbina de gas.....	21
3.3 Microturbinas de gas.....	23
3.4 Fuel cells.	23
3.5 Motores Stirling.	24
4. Selección de la tecnología para su modelamiento	26
5. Modelamiento motor Stirling.....	28
5.1 Ciclo Stirling.....	29
5.2 Principales configuraciones del motor Stirling.....	30
5.2.1 Motores Stirling tipo Alfa.....	30
5.2.2 Motores Stirling tipo Beta.....	32
5.2.3 Motores Stirling tipo Gamma	36
5.3 Configuración seleccionada.....	38

5.3.1 Parametrización y simulación del proceso.....	39
5.3.2 Ajuste de la simulación.....	47
5.3.3 Resultados.....	49
6. Conclusiones.....	56
Referencias Bibliográficas.....	58
Apéndices.....	60

Lista de Figuras

	Pag
Figura 1 <i>Toma aérea granja porcícola ECOCERD.</i>	14
Figura 2 <i>Vista frontal digestor ECOCERD.</i>	15
Figura 3 <i>Vista lateral digestor ECOCERD.</i>	16
Figura 4 <i>Vista frontal reservorio de biogás.</i>	16
Figura 5 <i>Motor GE Jenbacher Type 2.</i>	20
Figura 6 <i>Partes básicas motor GE Jenbacher Type 2.</i>	21
Figura 7 <i>Partes principales de una turbina de gas.</i>	22
Figura 8 <i>Partes principales de una célula de combustible.</i>	24
Figura 9 <i>Componentes básicos motor Stirling.</i>	25
Figura 10 <i>Ciclo Stirling teórico con movimiento de pistón discontinuo.</i>	29
Figura 11 <i>Esquema básico motor Stirling tipo Alfa.</i>	31
Figura 12 <i>Esquema básico motor Stirling tipo Beta.</i>	34
Figura 13 <i>Esquema básico motor Stirling tipo Gamma.</i>	37
Figura 14 <i>Motor Stirling tipo Gamma en Simulink.</i>	39
Figura 15 <i>Pistón de potencia en Simulink.</i>	45
Figura 16 <i>Pistón desplazador en Simulink.</i>	45
Figura 17 <i>Manivela deslizante y volante en Simulink.</i>	46
Figura 18 <i>Zona interna motor Stirling tipo Gamma.</i>	47
Figura 19 <i>Velocidad y potencia prueba 1.</i>	50
Figura 20 <i>Diagrama presión vs volumen prueba 1.</i>	51

Figura 21 *Velocidad y potencia prueba 2.* 52

Figura 22 *Diagrama presión vs volumen prueba 2.* 53

Lista de Tablas

	Pag
Tabla 1. <i>Carga especial instalada.</i>	17
Tabla 2. <i>Composición general del biogás.</i>	19

Resumen

Título: Diseño conceptual del aprovechamiento energético del biogás*

Autor: Christian Ernesto Aguilar Ramírez**

Palabras Clave: Biogás, digestión anaerobia, motor Stirling, MATLAB.

Descripción: El biogás, producto de la digestión anaerobia de materia orgánica, representa una alternativa viable y sostenible para la generación de energía renovable, así como para la reducción de emisiones contaminantes. El objetivo principal de este trabajo de grado es evaluar la viabilidad técnica de generación de energía eléctrica a partir del biogás producido en un digestor tubular instalado en una granja porcícola del municipio de Floresta, Boyacá. Este estudio, parte del reconocimiento de diversas tecnologías de conversión energética disponibles en el mercado para realizar dicho aprovechamiento, tales como, motores de combustión interna, microturbinas, motores Stirling, entre otras. Tras un análisis técnico de las opciones, se selecciona el motor Stirling tipo gamma debido a su capacidad de aprovechar la energía térmica del biogás, aun cuando los flujos del mismo son muy bajos. Posteriormente, se caracterizan las propiedades del biogás proveniente de la granja, considerando variables como el contenido de metano y las condiciones operativas del digestor. A continuación, se realiza la simulación del proceso de conversión de energía térmica a energía mecánica utilizando el software Matlab Simulink, que permite modelar un motor Stirling tipo gamma utilizando componentes y dominios Simscape específicos para gas, fuentes térmicas y partes mecánicas. Los resultados obtenidos permiten establecer lineamientos claves para el desarrollo de proyectos de aprovechamiento energético del biogás, destacando su potencial para contribuir a la diversificación energética, la gestión de residuos y el desarrollo sostenible.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías físico mecánicas. Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Director: Iván David Serna Suarez. Doctor en ingeniería área ingeniería eléctrica. Codirector: Liliana del Pilar Castro Molano. Doctora en ingeniería área ingeniería química.

Abstract

Title: Conceptual design of the energy use of biogas *

Author: Christian Ernesto Aguilar Ramírez ¹

Key Words: Biogas, anaerobic digestion, Stirling engine, MATLAB.

Description: Biogas, a product of the anaerobic digestion of organic matter, represents a viable and sustainable alternative for renewable energy generation, as well as for the reduction of pollutant emissions. The main objective of this thesis is to evaluate the technical feasibility of generating electrical energy from biogas produced in a tubular digester installed on a pig farm in the municipality of Floresta, Boyacá. This study starts with the recognition of various energy conversion technologies available on the market for this purpose, such as internal combustion engines, microturbines, Stirling engines, among others.

After a technical analysis of the available options, the gamma-type Stirling engine is selected due to its ability to harness the thermal energy of biogas, even when flow rates are very low.

Subsequently, the properties of the biogas from the farm are characterized, considering variables such as methane content and the operating conditions of the digester.

Next, the conversion process from thermal energy to mechanical energy is simulated using Matlab Simulink software, which makes it possible to model a gamma-type Stirling engine using specific Simscape components and domains for gas, thermal sources, and mechanical parts. The results obtained provide key guidelines for the development of biogas energy utilization projects, highlighting its potential to contribute to energy diversification, waste management, and sustainable development.

* Degree Work

¹ Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering. Director: Iván David Serna Suarez, PhD in Electrical Engineering. Co-director: Liliana del Pilar Castro Molano, PhD in Chemical Engineering.

Introducción

El aprovechamiento de fuentes de energía renovable se ha convertido en una de las estrategias más relevantes para enfrentar los retos asociados al cambio climático, la dependencia de combustibles fósiles y la necesidad de garantizar un suministro energético sostenible. Entre estas alternativas, el biogás generado a partir de la digestión anaerobia de residuos orgánicos ha adquirido gran importancia, no solo por su potencial como fuente de energía limpia, sino también por su contribución a la gestión adecuada de desechos agropecuarios.

En el contexto colombiano, el uso del biogás ya tiene aplicaciones concretas. Un ejemplo importante es la planta Biogás Doña Juana, en Bogotá, la cual recibe aproximadamente 6.700 toneladas de residuos sólidos urbanos al día, produce alrededor de 11.700 m³ de biogás por hora (con proyección de alcanzar 16.000 m³/h). Gracias a esta operación, se evita la emisión de alrededor de 800.000 toneladas de CO₂ al año (Unidad administrativa especial de servicios públicos, 2021).

De igual forma, el sector rural y agropecuario constituye una fuente significativa de residuos orgánicos susceptibles de ser transformados en biogás. En particular, el aprovechamiento del biogás producido a partir de estiércol porcino representa una alternativa técnica y ambientalmente relevante para las granjas porcícolas en Colombia. A nivel práctico, la utilización de purines porcinos en biodigestores permite transformar un residuo con impacto ambiental en energía térmica y eléctrica, además de productos de valor agregado como biol (fertilizante) y subproductos para el manejo de suelos. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ha desarrollado guías y programas dirigidos al sector porcícola, que promueven el

diseño y la implementación de soluciones de digestión anaerobia adaptadas a granjas (Fondo nacional de la porcicultura, 2020).

A pesar de estos avances, en muchas zonas rurales del país, el potencial energético de estos residuos permanece subutilizado, mientras que las comunidades continúan enfrentando limitaciones de acceso a energía confiable y de bajo costo. Esta situación plantea la necesidad de explorar alternativas tecnológicas viables que permitan aprovechar dichos recursos de manera eficiente y sostenible.

El problema que se aborda en este trabajo se centra en la evaluación de la implementación de un sistema capaz de convertir el biogás en energía eléctrica en una pequeña granja. Aunque existen tecnologías probadas a nivel global, su adaptación a contextos locales y de muy baja escala requiere de un análisis técnico que pueda garantizar su sostenibilidad y pertinencia de instalación.

En este marco, la presente investigación se justifica en la medida que busca demostrar que el biogás no solo constituye una solución para el manejo de residuos orgánicos, sino también una oportunidad para diversificar la matriz energética en el ámbito rural. Así mismo, su implementación contribuye al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), particularmente en lo relacionado con energía asequible y no contaminante (ODS 7), producción y consumo responsables (ODS 12), y acción por el clima (ODS13).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnica de generación de energía eléctrica del biogás de un digestor tubular.

1.2 Objetivos Específicos

Seleccionar a partir de revisión bibliográfica tecnologías disponibles para el aprovechamiento de biogás como energía eléctrica.

Simular la tecnología de conversión de biogás [m^3/d] a potencia eléctrica [kW] más eficiente, para estimar la energía eléctrica generada por una fuente de biogás.

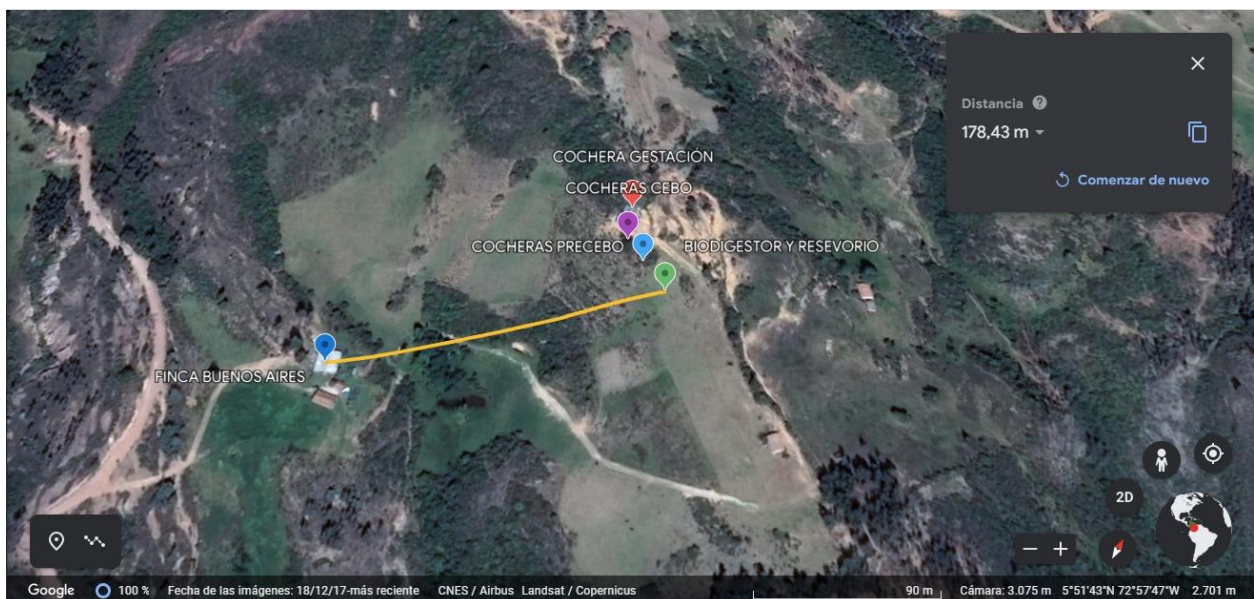
2. Generalidades

Para cumplir con los objetivos de este proyecto de grado, se decide realizar toda la investigación y estudio en la Granja porcícola ECOCERD. Esta granja se encuentra ubicada en la vereda Chorrera del municipio de Floresta en el departamento de Boyacá ($5^{\circ}51'42.3''$ N $72^{\circ}57'51.6''$ O). La granja porcícola ECOCERD S A S es un establecimiento constituido legalmente el 13 de septiembre del año 2019 y desde entonces viene ejerciendo actividades agrícolas que se especializan en la cría de ganado porcino. Cuenta con registro mercantil de la cámara de comercio de Duitama y su representante legal y administrador es el señor Fernando Arellán Barajas.

La Figura 1 muestra una imagen satelital de la granja donde se puede ver la extensión total de la granja que son 10 hectáreas, así como parte de su distribución.

Figura 1

Toma aérea granja porcícola ECOCERD.



DISEÑO CONCEPTUAL DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS 15

La decisión de utilizar esta granja como lugar de investigación obedece a que actualmente y desde hace un tiempo la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander tiene instalado un digestor tubular de 40 m^3 que genera diariamente entre 10 y 14 m^3 de biogás de alta pureza que se almacena en un reservorio que se encuentra justo al lado del digestor. Este biogás se produce a partir de un proceso de recolección y digestión de todos los desechos sólidos y líquidos que generan los 120 cerdos que se encuentran actualmente en la granja. El biogás purificado se utiliza comúnmente como fuente de combustible para cocinar el concentrado con que se alimentan los cerdos. En las figuras 2 y 3 se puede observar el digestor que contiene los desechos, mientras que en la figura 4 se puede ver el reservorio donde se almacena el gas filtrado y purificado listo para usar.

Figura 2

Vista frontal digestor ECOCERD.



Figura 3

Vista lateral digestor ECOCERD.



Figura 4

Vista frontal reservorio de biogás.



2.1 Condiciones de la granja.

Como fruto de una visita, se pudo conocer de primera mano las condiciones actuales de la granja, así como sus necesidades energéticas.

La granja ECOCERD es el usuario con el punto final de conexión de una red bifásica que alimenta la vereda. El administrador manifiesta haber instalado toda la postería y cableado de la acometida cuando se hizo acreedor al terreno. De igual manera, hace saber que el operador de red es la Empresa de energía de Boyacá (EBSA) y que actualmente se encuentra tipificado como usuario comercial y residencial. La tipificación como usuario comercial obedece a que la granja cuenta con cargas especiales que necesita para su correcto funcionamiento.

Debido a que el fluido eléctrico presenta irregularidades e intermitencias, el funcionamiento de las cargas especiales lo está realizando usando gasolina, generando así altos costos operacionales e impactos medioambientales más fuertes.

La carga especial instalada en la granja se encuentra enunciada detalladamente en la Tabla 1.

Tabla 1.

Carga especial instalada.

<i>Cargas especiales</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Potencia (kW)</i>	<i>Total (kW)</i>
<i>Motores de secado</i>	<i>2</i>	<i>0,12</i>	<i>0,24</i>
<i>Motor de alimento de cerdos</i>	<i>1</i>	<i>12</i>	<i>12</i>
<i>Mezcladora de alimento</i>	<i>1</i>	<i>0,746</i>	<i>0,746</i>
<i>Bombillos de calefacción</i>	<i>7</i>	<i>0,25</i>	<i>1,75</i>
<i>Hidro lavadora</i>	<i>1</i>	<i>1,5</i>	<i>1,5</i>
<i>Motobomba</i>	<i>1</i>	<i>1,5</i>	<i>1,5</i>
<i>Lampara hermética</i>	<i>12</i>	<i>0,036</i>	<i>0,432</i>

3. Tecnologías para el aprovechamiento de biogás

La necesidad de alternativas de producción energética, mediante la implementación de prácticas ambientalmente sostenibles y el aprovechamiento de los recursos disponibles, crean un clima favorable para la promoción en implementación de la tecnología de biodigestores, obteniendo como beneficio la producción de biogás. Por tanto, aprovechar de manera eficiente este combustible es de gran importancia para sustituir las tradicionales fuentes energéticas no renovables, escasas y costosas, convirtiendo la explotación agropecuaria en una actividad económica más rentable y menos contaminante (Quesada et al., 2011).

La tecnología de la biodigestión anaerobia para la producción de biogás contribuye a disminuir la contaminación del medio ambiente, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y ahorrar los combustibles fósiles y fertilizantes químicos; así como mejora la calidad de vida de los pobladores en zonas rurales y suburbanas (Equipo Bioguía, 2013).

Generalmente, en la mayoría de los países latinoamericanos, el biogás ha tenido un uso limitado a la cocción de alimentos y calefacción de animales de granja. A pesar de esto, el uso del biogás en la sustitución de combustibles fósiles, para la generación de electricidad en motores de combustión interna ha cobrado importancia en los últimos años. El biogás puede ser utilizado para reemplazar la gasolina hasta en un 100 %, mientras que en motores Diesel sólo se logra un máximo de 80 %, debido a que la baja ignición del biogás no permite que haya explosión en este tipo de motores que carecen de bujía (IRENA, 2018).

Los principales componentes del biogás son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂); aunque la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada, su composición aproximada se presenta en la Tabla 2. El metano, principal componente del biogás, es el gas que

le confiere las características combustibles, mientras que su valor energético está determinado por la concentración de este gas (alrededor de 20-25 MJ/m³, comparado con 33-38 MJ/m³ en el gas natural) (Werner et al., 1989).

Tabla 2.

Composición general del biogás.

<i>Compuesto</i>	<i>Cantidad Aproximada</i>
<i>Metano</i>	<i>40% - 75%</i>
<i>Dióxido de carbono</i>	<i>15% - 60%</i>
<i>Vapor de agua</i>	<i>5% - 10%</i>
<i>Ácido Sulfhídrico</i>	<i>0.005% - 2%</i>
<i>Siloxanos</i>	<i>0% - 0.02%</i>
<i>Hidrocarburos halogenados</i>	<i><0.6%</i>
<i>Amoniaco</i>	<i><1%</i>
<i>Oxígeno</i>	<i>0% - 1%</i>
<i>Monóxido de carbono</i>	<i><0.6%</i>
<i>Nitrógeno</i>	<i>0% - 2%</i>

Nota: tomada de (Aparicio, 2015)

La mayoría de los proyectos que se encuentran actualmente en operación utilizan turbinas, microturbinas o motores de combustión interna. El uso de estas diferentes tecnologías depende principalmente del flujo, la pureza y presión del gas que se vaya a utilizar. De igual manera las aplicaciones de cogeneración están aumentando a nivel global, ya que proveen mayor eficiencia energética, pues se aprovecha tanto la energía térmica como la energía eléctrica en un proceso único.

3.1 Motores reciprocantes de combustión interna.

Los motores reciprocantes de combustión interna son los más utilizados ya que presentan alta eficiencia en comparación con las turbinas de gas y microturbinas. Son de bajo costo por kW en comparación con las turbinas de gas y microturbinas, y existen en varios tamaños adecuados a los flujos de biogás. La eficiencia de estos motores varía entre 21 y 41%, aunque se pueden alcanzar mayores rendimientos en aplicaciones de cogeneración, cuando se recupera el calor residual que puede ser utilizado para otras aplicaciones. También presentan la ventaja de permitir añadir o quitar los motores según las tendencias de recuperación de gas. Como desventajas se encuentran sus costos de mantenimiento que son relativamente altos y la generación de emisiones a la atmósfera. El rango de tamaño para proyectos típicos asumiendo 50 % de metano en el biogás es entre 8 y 30 m³/min de biogás, y capacidades entre 800 kW y 3 MW; para proyectos de mayor escala se pueden combinar varios motores (Blanco et al., 2017).

Figura 5

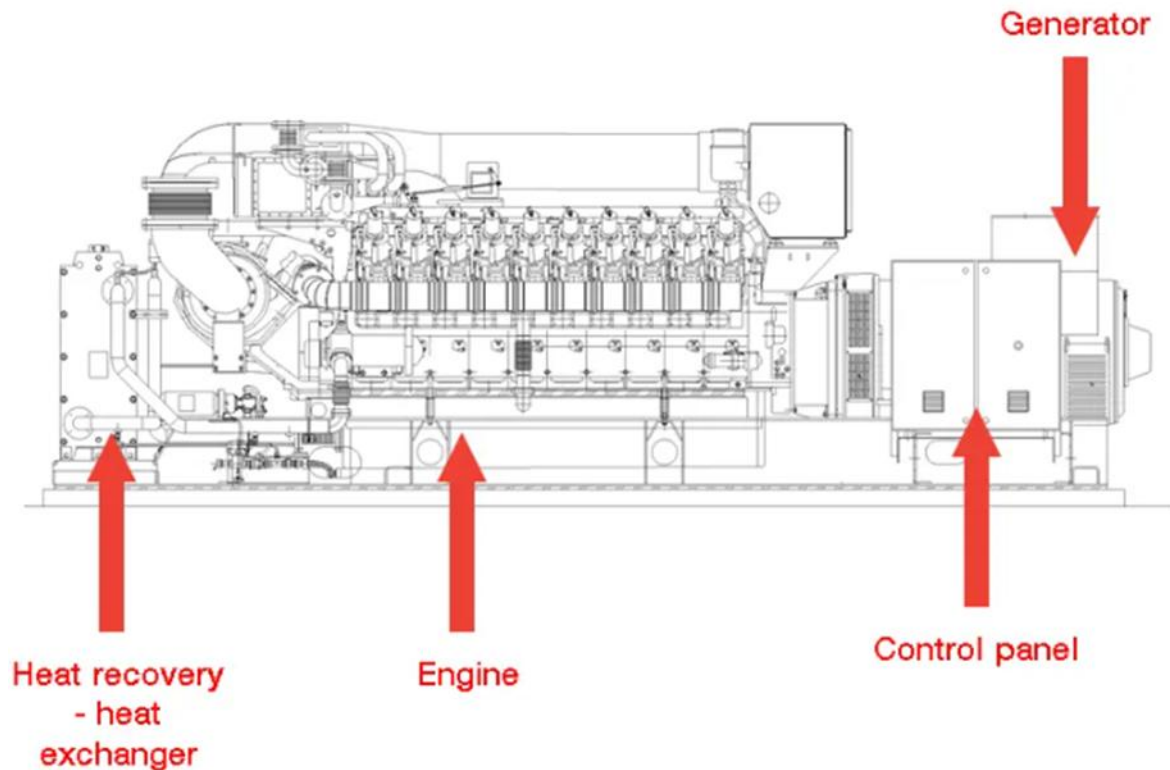
Motor GE Jenbacher Type 2.



Tomada de: (Blanco et al., 2017)

Figura 6

Partes básicas motor GE Jenbacher Type 2.



Tomada de: (Blanco et al., 2017)

La generación de electricidad utilizando biogás en motores de combustión interna requiere de la purificación del combustible con la finalidad de reducir aquellos constituyentes que resultan agresivos para los motores o producen niveles de emisión de contaminantes por encima de los niveles permitidos (Blanco et al., 2017).

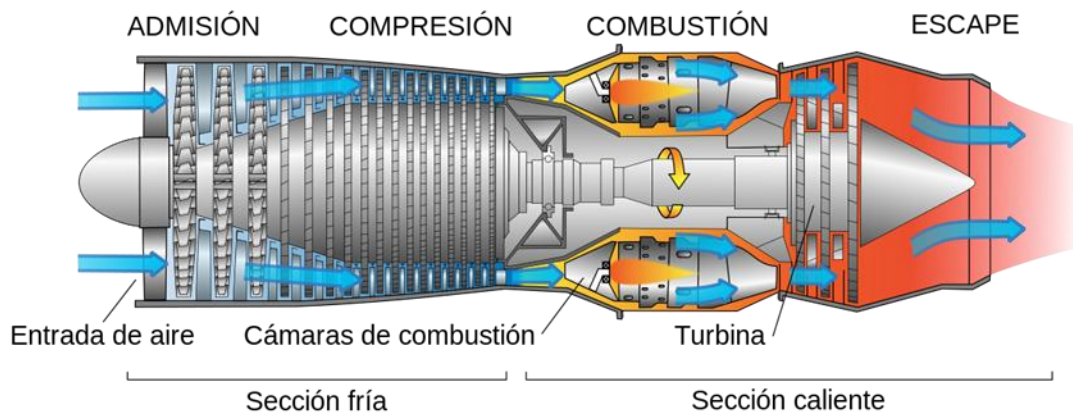
3.2 Turbina de gas.

Se conoce como un tipo de motor de combustión interna, a través del cual un fluido en forma de gas pasa de manera continua. Dicho gas se transforma en energía mecánica generando calor en forma de gas con un alto porcentaje de oxígeno. Para su funcionamiento se usa aire proveniente de la atmósfera que debe pasar a través de un compresor. Dicho aire ya comprimido

reacciona con un combustible de forma dispersada generando así la combustión que emite un flujo con alta temperatura. Este flujo ingresa a otra sección de la turbina donde se expande y logra la disminución de presión de salida. Como resultado se obtienen gases a alta temperatura o una alta velocidad generando así movimiento en los ejes de la turbina. Tal movimiento da energía al compresor, al generador, entre otros componentes (Instrumentos de medición, 2025).

Figura 7

Partes principales de una turbina de gas.



Tomada de: (Instrumentos de medición, 2025)

Por su dimensionamiento de producción encontramos que pequeñas turbinas a gas llegan a generar 0.5 - 2.5 MW, cuentan con una eficiencia eléctrica del 15 - 25%. Seguidamente encontramos turbinas de generación de 2.5 - 50 MW, con eficiencia eléctrica del 35 - 45%; sin embargo, son turbinas clasificadas Aero-derivativas y se usan como motor principal en aeronaves. Por último, encontramos las turbinas de trabajo pesado, éstas tienen un rango de generación de 3 - 480MW y cuentan con una eficiencia del 30 - 46%. Para su funcionamiento las pequeñas turbinas de gas usan una temperatura aproximada de 982°C, las Aero-derivativas alcanzan una temperatura de 704 - 927°C y las turbinas de trabajo pesado podemos encontrar temperaturas de 1371°C (Instrumentos de medición, 2025).

3.3 Microturbinas de gas.

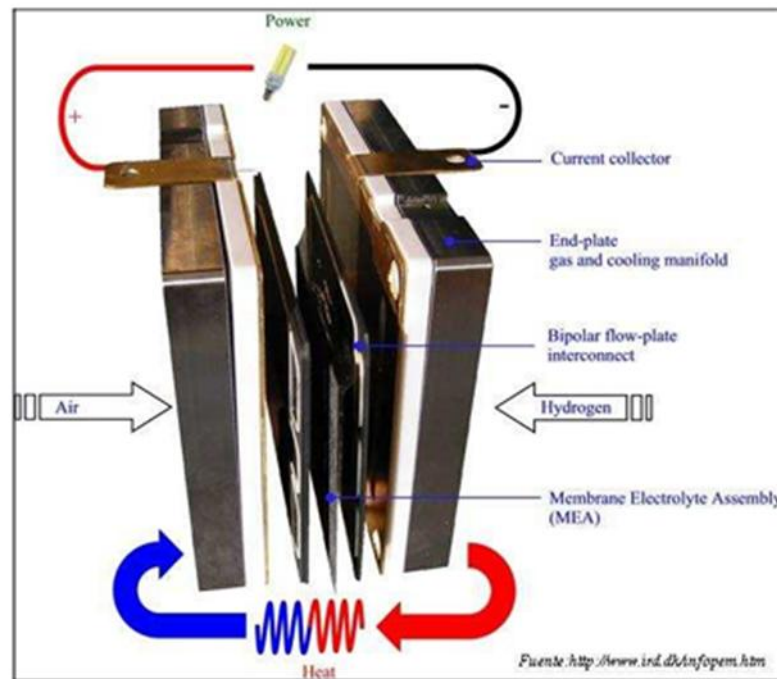
Las microturbinas se utilizan cuando se tiene una recuperación de biogás menor a 8 m³/min con contenidos mínimos de metano de hasta 35 %; resultan más costosas por kW generado, aunque tienen la ventaja de que se pueden añadir o quitar en función del flujo de biogás. Como tienen baja capacidad de generación son fáciles de interconectar y generan menos emisiones de óxidos de nitrógeno. Requieren de un tratamiento primario del biogás que incluya remoción de siloxanos, humedad, y material particulado. Las microturbinas se comercializan en tamaños de 30, 70, y 250 kW, y presentan las ventajas de tener un costo de capital reducido, bajo costo de mantenimiento y de las instalaciones, y una eficiencia que aumenta con el tamaño. Con la finalidad de incrementar la eficiencia de las microturbinas, generalmente se incorpora un recuperador que precaliente el aire de combustión. En EEUU se está trabajando para desarrollar microturbinas de mayor eficiencia (mínimo 40%), que alcancen las 45.000 horas de servicio y mantenimiento cada 11.000 h a un costo inferior a los US 500 por kW (Blanco et al., 2017).

3.4 Fuel cells.

Es una tecnología que convierte la energía química del combustible directamente en energía eléctrica (DC) sin necesidad de calentamiento previo, ya que se da gracias a un proceso electroquímico opuesto a la combustión que impulsa el proceso mecánico de un generador eléctrico. Dentro de ellas se reforma el metano con vapor para producir hidrógeno que al reaccionar con el oxígeno dentro de la celda generan energía eléctrica. Existen varios tipos de celdas de combustible como lo son las alcalinas, Carbón fundido, membrana de intercambio protónico, óxido sólido y ácido fosfórico.

Figura 8

Partes principales de una célula de combustible.



Tomada de: (Smithsonian Institution, 2020)

Para nuestro interés las celdas de carbonato fundido (MCFC's) usa compuestos de sal de altas temperaturas, carbonatos como electrolito, tiene una temperatura de funcionamiento de 650°C. Sus diseños comienzan en unidades de hasta 2MW y se extiende hasta los 100MW. Con un combustible normalmente tienen una eficiencia entre el 60 - 80% (Smithsonian Institution, 2020). Según el "EPA report" la eficiencia de convertir biogás en una celda de combustible está entre 42 - 54%, esto a una temperatura máxima de 18°C en el ambiente (UC Davis Biomass Collaborative; National Risk Management Research Lab, 2016)

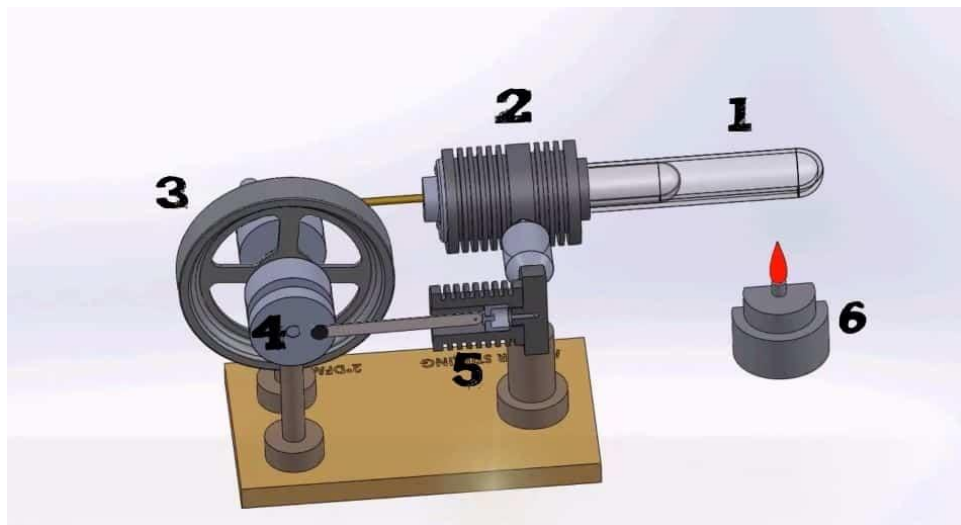
3.5 Motores Stirling.

El motor Stirling es un motor térmico que opera por compresión y expansión cíclica de aire u otro gas (conocido como fluido de trabajo) a diferentes niveles de temperatura que producen una

conversión neta de energía calorífica a energía mecánica. De manera más específica, se trata de un motor térmico de ciclo cerrado regenerativo con un fluido gaseoso permanente. En esta definición, ciclo cerrado describe un sistema termodinámico en el que el fluido está permanente contenido en el sistema, y regenerativo describe el uso de un tipo específico de intercambio de calor y almacenamiento térmico. La inclusión de un regenerador es precisamente lo que diferencia a los motores Stirling de otros motores de ciclo cerrado (Walker, 1980). En la Figura 9 se pueden observar los componentes básicos que componen un motor Stirling. El número 1 representa la zona de calentamiento, el número 2 el cilindro desplazador, el número 3 el volante de inercia, el número 4 el cigüeñal, el número 5 el pistón, y finalmente el número 6 representa el quemador o fuente de calor.

Figura 9

Componentes básicos motor Stirling.



Tomada de: (Amaya, 2015)

A diferencia de los motores de combustión interna, el motor Stirling puede generar energía mecánica a partir de cualquier fuente de energía térmica. Teóricamente puede ser muy eficiente en la conversión de calor a trabajo mecánico, llegando incluso a valores cercanos a la eficiencia

de Carnot. El límite térmico para el funcionamiento de un motor Stirling depende de los materiales utilizados para su construcción (Puech y Tishkova, 2011).

4. Selección de la tecnología para su modelamiento

A través de un análisis comparativo de la revisión bibliográfica reciente, se determina que los motores Stirling representan la solución más ventajosa desde perspectivas técnicas, económicas y ambientales. Esta viabilidad se fundamenta en la capacidad del motor Stirling para operar con cualquier fuente de calor externa, su adaptabilidad para la generación de energía a pequeña escala y su potencial para la cogeneración CHP, lo cual puede elevar la eficiencia global del sistema.

Este proyecto de grado aborda una problemática crítica para el desarrollo sostenible del sector agropecuario en áreas rurales. Y una correcta selección de la tecnología de conversión es el paso fundamental para validar la viabilidad del proyecto.

De acuerdo a la literatura especializada consultada, existen diversas tecnologías para la conversión de biogás en energía. Las opciones más comunes fueron expuestas anteriormente. Sin embargo, la idoneidad de cada tecnología depende de parámetros específicos del proyecto a desarrollar, como el flujo, la pureza del biogás y de manera crucial, la escala de aplicación. Para el contexto de la granja, donde el flujo de biogás es relativamente bajo (aproximadamente 12 m³/día), la mayoría de tecnologías convencionales presentan limitaciones significativas.

Los motores reciprocantes de combustión interna, si bien son ampliamente utilizados y presentan eficiencias entre el 21% y 41%, no son la opción más adecuada para esta escala. Son a menudo usados para proyectos de mayor envergadura. En cambio, los motores Stirling operan

con eficiencias típicas entre el 10% y 25% dependiendo de la temperatura de trabajo y el diseño, ofreciendo una alternativa más simple para potencias pequeñas y con la ventaja de poder aprovechar directamente el biogás sin requerir procesos complejos de combustión interna.

Las turbinas y microturbinas de gas son una alternativa que puede adaptarse para la generación de energía a pequeña escala, con modelos que van desde los 30 kW hasta 250kW. A pesar de sus ventajas, como la baja emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO), su implementación para el biogás de origen porcino presenta desafíos. Requieren un tratamiento primario del biogás, que incluye la remoción de siloxanos y humedad, así como la compresión del gas a aproximadamente seis atmósferas. Este requisito de compresión y purificación aumenta la complejidad y el costo, volviendo esta tecnología menos atractiva para una pequeña granja.

Por su parte, las celdas de combustible son reconocidas por su alta eficiencia eléctrica (60% - 80%). Sin embargo, su complejidad tecnológica, altos costos y estrictos requerimientos de pureza del biogás las convierte en una opción inviable para una aplicación tan modesta y con recursos limitados como esta.

El motor Stirling, en contraste, se presenta como una solución acertada para este proyecto. Como motor de combustión externa, tiene la capacidad de utilizar cualquier fuente de energía térmica, lo que lo hace excepcionalmente flexible. Esto es fundamental para el biogás, cuya composición puede variar según el tipo de materia orgánica, y cuyo contenido de metano puede fluctuar entre el 40% y el 75%. La combustión del biogás tiene lugar en una cámara externa, lo que permite una quema más completa y controlada a presión atmosférica. Resultando en niveles de emisión de contaminantes más bajos. Además, el motor Stirling destaca por tener una operación silenciosa, baja vibración y alta durabilidad.

Otro aspecto relevante es la ventaja del motor Stirling para operar como un sistema de cogeneración, el sistema no solo generaría energía mecánica, sino que también podría recuperar y utilizar el calor residual de la combustión, con eficiencias térmicas que pueden estar entre el 40% y el 50%.

Desde el punto de vista económico, la implementación de este sistema ofrece beneficios tangibles y a largo plazo. La generación de energía a partir del biogás gratuito de la granja reemplaza el uso de costosa gasolina, lo que se traduce en un ahorro directo y una mayor rentabilidad en la operación agropecuaria.

Adicionalmente, el uso de esta tecnología representa una contribución significativa a la economía circular, transformando un residuo contaminante, como los desechos porcinos, en una fuente de energía renovable y valiosa.

5. Modelamiento motor Stirling

El motor Stirling fue inventado en 1816 por Robert Stirling. La primera era del motor Stirling terminó con el rápido desarrollo del motor de combustión interna y del motor eléctrico. A pesar de que se han realizado una amplia gama de investigaciones sobre el desarrollo del motor Stirling, aun se necesitan desarrollos más amplios para aplicaciones prácticas. El uso de motores Stirling es ideal para la generación de energía a pequeña escala y aplicaciones domésticas, ya que tienen capacidad de funcionamiento multi combustible, bajo consumo de combustible y bajo nivel de ruido. Las aplicaciones actuales en desarrollo son calefacción y enfriamiento, combinación de potencia y calor, bombas de calor, motores marinos, crioenfriadores, entre otros. Se han realizado modelos demostrativos de motores Stirling comerciales de baja diferencia de

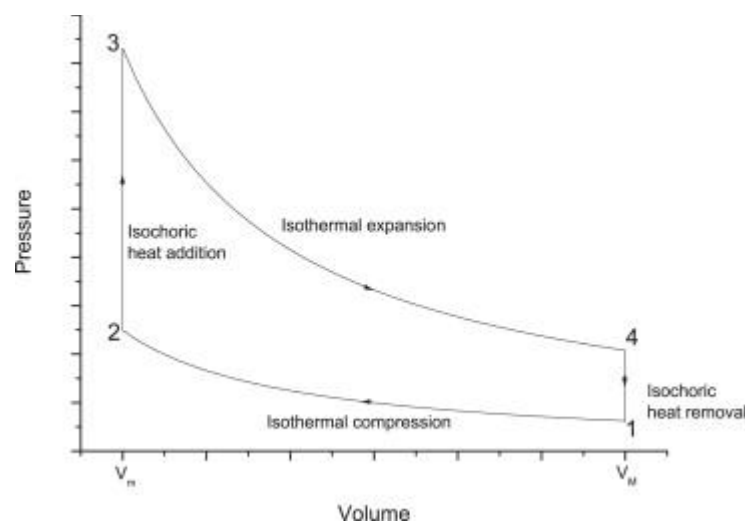
temperatura que funcionan sobre cualquier superficie cálida, incluso sobre una taza de agua caliente. La reducción de las dimensiones puede dar lugar a nuevos diseños, el componente móvil podría llegar a sustituirse por membranas vibratorias tal como sucede con el motor de membrana miniaturizado (Puech y Tishkova, 2011).

5.1 Ciclo Stirling

El ciclo Stirling consta de dos procesos isotérmicos y dos procesos isocóricos. Durante la compresión isotérmica (1-2) el pistón frío se mueve hacia el regenerador. En el siguiente paso (2-3), ambos pistones se mueven de manera similar para que el volumen permanezca constante y el fluido de trabajo se transfiera a través del regenerador. A este paso le sigue el proceso de expansión isotérmica (3-4) en el que solo se mueve el pistón caliente. En el paso (4-1) ambos pistones se mueven manteniendo el volumen constante y transfiriendo el fluido de trabajo a través del regenerador. Este es un ciclo ideal que asume la perfecta transferencia de calor y no tiene en cuenta las pérdidas de calor durante la regeneración (Puech y Tishkova, 2011).

Figura 10

Ciclo Stirling teórico con movimiento de pistón discontinuo.



Tomada de: (Puech y Tishkova, 2011)

5.2 Principales configuraciones del motor Stirling

El principio de funcionamiento de los motores Stirling opera siguiendo el ciclo de trabajo descrito anteriormente, sin embargo, existen diversas configuraciones en estos motores que permiten obtener mejores eficiencias térmicas, menores costos constructivos, mayor aprovechamiento de espacios, entre otros factores importantes para saber qué tipo de motor es el más beneficioso para determinada problemática.

Entre las principales configuraciones de los motores Stirling se pueden encontrar: tipo Alfa, tipo Beta, tipo Gamma, tipo Ringbom, tipo delta, tipo rotativo, entre otras. Siendo las tres primeras las más estudiadas y usadas.

5.2.1 Motores Stirling tipo Alfa

El motor Stirling tipo Alfa es una de las configuraciones más comunes y avanzadas de los motores Stirling. Este diseño se caracteriza por tener dos cilindros separados, uno en la parte caliente del motor y otro en la parte fría. Los pistones dentro de estos cilindros trabajan de manera coordinada para mover el gas de un lado a otro y aprovechar su expansión y contracción debido al calor. Su funcionamiento se compone de cuatro fases básicas que son:

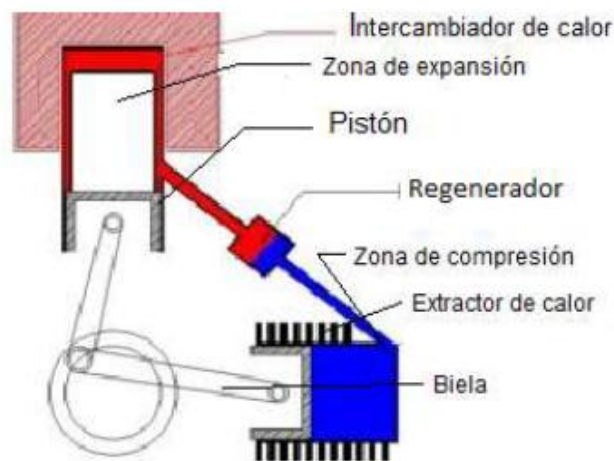
- Fase de expansión o calentamiento: en esta fase el gas en el cilindro caliente se calienta (a través de una fuente externa como combustión de biogás u otro combustible, energía solar, etc.) y se expande. Esta expansión empuja el pistón en el cilindro caliente hacia afuera, generando trabajo.
- Transferencia de calor: después de la expansión, el gas caliente es transferido desde el cilindro caliente hacia el cilindro frío. Aquí es donde un regenerador (si está presente) puede almacenar parte del calor para aumentar la eficiencia.

- Fase de compresión o enfriamiento: en el cilindro frío, el gas se enfría (a menudo mediante un radiador o intercambiador de calor), lo que hace que se contraiga y el pistón en el cilindro frío sea empujado hacia dentro. Este movimiento permite el ciclo de trabajo inverso.
- Regeneración de calor: el gas frío que sale del cilindro pasa a través del regenerador, donde recupera calor previamente almacenado, y luego regresa al cilindro caliente, listo para repetir el ciclo.

En la Figura 11 se pueden observar el esquema básico del motor Stirling tipo Alfa.

Figura 11

Esquema básico motor Stirling tipo Alfa.



Tomada de: (Duato, 2016)

Algunas ventajas de los motores Stirling tipo Alfa son:

- Alta eficiencia: debido a que el gas se encuentra en cilindros separados, la transferencia de calor es más directa, maximizando la eficiencia térmica.

- Mayor relación de compresión: los motores en configuración alfa pueden operar con una alta relación de compresión debido a que la diferencia de temperatura entre los dos cilindros se encuentra más acentuada, mejorando el rendimiento del motor.

Entre sus desventajas se pueden encontrar:

- Complejidad mecánica: al tener dos pistones en cilindros separados, el diseño es más complicado y requiere un control preciso del movimiento de ambos pistones.
- Mayor coste de fabricación: los componentes adicionales y el diseño más complejo hacen que el motor tipo Alfa sea más caro de fabricar en comparación con otras configuraciones de motores Stirling.
- Requiere mejor control de temperatura: para operar de manera eficiente, necesita una fuente de calor constante y eficiente, así como un sistema eficaz de enfriamiento en el lado frío.
- Alto volumen muerto: El volumen muerto es el volumen total de fluido de trabajo que ocupa el espacio muerto en el motor. Estos espacios incluyen el regenerador y el puerto de transferencia. En cualquier tipo de motor Stirling real, este espacio es inevitable y puede representar el 58% del fluido de trabajo total (Giannakakis et al., 2017).

Teniendo en cuenta sus características constructivas y de funcionamiento, sus ventajas y desventajas, los motores Stirling tipo Alfa se utilizan en aplicaciones donde se dispone de una fuente de calor continua y confiable.

5.2.2 Motores Stirling tipo Beta

El motor Stirling tipo Beta utiliza un solo cilindro y tiene dos componentes principales dentro de él: un pistón de potencia y un desplazador. Ambos se mueven dentro del mismo cilindro, pero el desplazador tiene la función específica de mover el gas entre las zonas calientes y frías,

mientras que el pistón de potencia genera trabajo útil al aprovechar la expansión y contracción del gas. Los motores tipo Beta presentan las siguientes características y componentes:

- Mono cilíndrico: A diferencia del motor Stirling tipo Alfa que tiene dos cilindros separados (uno caliente y otro frío), el motor tipo Beta utiliza un solo cilindro compartido para las zonas calientes y frías.
- El desplazador: es un componente ligero que se mueve dentro del cilindro sin generar potencia, empuja el gas entre las áreas caliente y fría del cilindro para facilitar su expansión y contracción. Este desplazador no está sellado de manera perfecta, lo que permite que el gas fluya a su alrededor.
- El pistón de potencia: está ubicado en el extremo frío del cilindro y es el encargado de generar el trabajo útil. La expansión del gas en el lado caliente empuja este pistón hacia afuera y la contracción en el lado frío lo hace retroceder.
- Fuente de calor y sistema de enfriamiento: el extremo caliente del cilindro se calienta mediante una fuente externa (puede ser una llama o energía solar concentrada), mientras que el extremo frío se enfría con un intercambiador de calor o radiador.

El ciclo de trabajo de un motor Stirling tipo Beta sigue las cuatro fases básicas del ciclo Stirling.

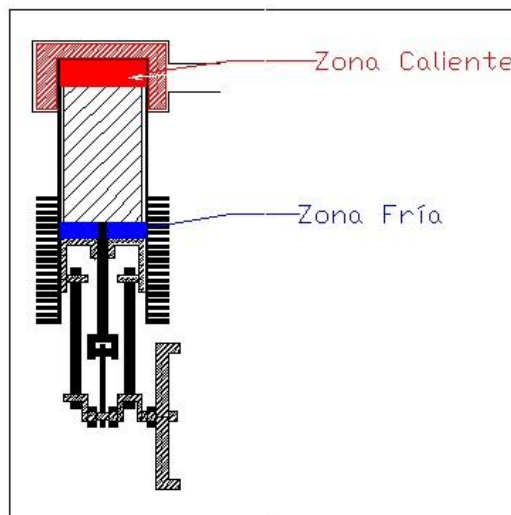
- Fase de expansión: en esta fase el desplazador se mueve hacia a zona fría del cilindro, empujando el gas hacia la zona caliente. Al calentarse el gas en la zona caliente se expande y empuja el pistón de potencia hacia afuera, generando trabajo útil.
- Transferencia de gas: después de la expansión, el desplazador se mueve hacia la zona caliente, empujando el gas hacia la zona fría. Durante este movimiento no se genera trabajo, ya que el desplazador no está sellado ni genera presión significativa.

- Fase de compresión: cuando el gas llega a la zona fría del cilindro, se enfría y se contrae, lo que tira del pistón de potencia hacia adentro. Esta compresión prepara el sistema para el siguiente ciclo de expansión.
- Recuperación de calor: en algunos motores Beta, un regenerador puede estar presente para almacenar parte del calor residual durante el ciclo de enfriamiento y reutilizarlo cuando el gas regrese a la zona caliente, mejorando así la eficiencia.

La Figura 12 muestra el esquema básico de un motor Stirling tipo Beta.

Figura 12

Esquema básico motor Stirling tipo Beta.



Tomada de: (Duato, 2016)

Entre las ventajas del motor tipo Beta se encuentran:

- Diseño compacto: al utilizar un solo cilindro, el motor beta es más compacto y sencillo en su construcción que los motores tipo Alfa.
- Menor complejidad mecánica: Con menos partes móviles, solo un cilindro y dos componentes principales, hay menos desgaste y menor necesidad de mantenimiento en comparación con los motores tipo Alfa.

- Ideal para bajas potencias: El diseño Beta es eficiente a escalas pequeñas y es ideal para aplicaciones que requieren una generación de potencia moderada.
- Eficiencia aceptable: aunque los motores tipo Beta no son tan eficientes como los motores tipo Alfa, pueden lograr una eficiencia razonable en aplicaciones de baja potencia con una diferencia moderada de temperaturas entre las zonas caliente y fría.

Dentro de las desventajas de este tipo de motores se pueden considerar:

- Enfriamiento eficiente requerido: Para que el motor funcione de manera eficiente, es esencial un buen sistema de enfriamiento en el extremo frío del cilindro, lo que puede añadir cierta complejidad al diseño.
- Menor potencia: el motor tipo Beta genera menos potencia que el motor tipo Alfa, ya que el volumen de gas involucrado en la expansión es menor, y la diferencia de temperatura entre las áreas caliente y fría es menos pronunciada.
- Menor eficiencia en comparación con tipo Alfa: esto se debe a que el pistón de potencia y el desplazador comparten el mismo cilindro, la transferencia de calor no es tan eficiente como en los motores Alfa, donde separan las zonas calientes y frías en cilindros distintos.

Debido a su diseño más compacto y simple, los motores Stirling tipo Beta se utilizan en una variedad de aplicaciones de baja a moderada potencia, donde la eficiencia no es el factor más crítico. Algunas de estas aplicaciones incluyen, pequeñas plantas de cogeneración o sistema solares térmicos, generadores de energía portátiles, refrigeradores Stirling (invirtiendo el ciclo), entre otras. Esta configuración produce la menor potencia, con fuentes que citan una eficiencia del 12% al 18%. Esto se debe principalmente a que la calefacción y la refrigeración se encuentran contenidas en un solo cilindro, lo que significa que la conducción de calor al extremo de refrigeración y viceversa se produce con bastante facilidad (Giannakakis et al., 2017).

En conclusión, el motor Stirling tipo Beta es un diseño atractivo cuando se busca simplicidad y menor costo, sin sacrificar demasiado la eficiencia. Su capacidad para generar potencia de manera fiable y con pocas piezas móviles lo hace ideal en pequeñas y medianas aplicaciones donde la durabilidad y la baja complejidad son importantes.

5.2.3 Motores Stirling tipo Gamma

El motor Stirling tipo Gamma es otra configuración popular del motor Stirling. Es similar al motor tipo Beta, pero con una diferencia clave: en lugar de tener el pistón de potencia y desplazador en el mismo cilindro, el motor gamma los coloca en cilindros separados. Este diseño simplifica algunos aspectos mecánicos y permite una mayor flexibilidad en el diseño y la operación.

El cilindro del desplazador es un cilindro grande, donde el desplazador mueve el gas de un lado a otro entre las zonas caliente y fría. El cilindro del pistón de potencia es un cilindro más pequeño, en el cual el pistón de potencia convierte el movimiento del gas (expansión y contracción) en trabajo útil. Entre las principales características y componentes de este tipo de motor se pueden encontrar:

- Cilindros separados: el motor tipo Gamma tiene dos cilindros separados. El desplazador mueve el gas entre las zonas calientes y frías en uno de los cilindros, mientras que el pistón de potencia está en un cilindro aparte y conectado al cilindro del desplazador.
- El desplazador: es una pieza liviana que se mueve dentro de su cilindro. No genera trabajo directamente, pero mueve el gas entre las áreas caliente y fría, lo que permite que el gas se expanda y se contraiga, generando trabajo en el pistón de potencia.

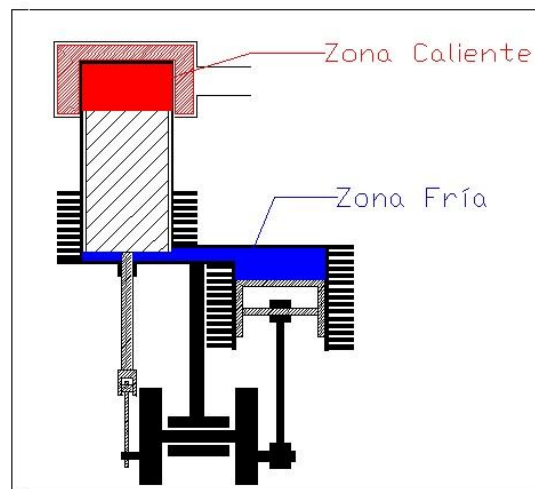
- Pistón de potencia: el pistón de potencia está en un cilindro diferente al desplazador, conectado a través de un conducto por donde el gas fluye entre ambos cilindros. Es el componente que genera el trabajo útil aprovechando la expansión y contracción del gas.
- Fuente de calor y sistema de enfriamiento: el cilindro del desplazador tiene una parte caliente y una parte fría. La parte caliente se calienta con una fuente externa, mientras que la parte fría se enfría mediante un intercambiador de calor o un radiador.

El motor Stirling tipo Gamma sigue las mismas cuatro fases del ciclo termodinámico Stirling.

La Figura 13 permite evidenciar el esquema básico del motor Stirling tipo Gamma.

Figura 13

Esquema básico motor Stirling tipo Gamma.



Tomada de: (Duato, 2016)

Las principales ventajas que presentan los motores Stirling tipo Gamma son:

- Diseño más simple y flexible: al tener el pistón de potencia y el desplazador en cilindros separados, este tipo de motor es más simple en su construcción que el motor tipo Alfa y tiene menos restricciones en términos de espacio. Los dos cilindros pueden colocarse en diferentes ángulos o configuraciones para adaptarse mejor a diversas aplicaciones.

- Menor tensión mecánica: el motor tipo Gamma generalmente experimenta menos tensiones mecánicas que el motor tipo Alfa, lo que reduce el desgaste de los componentes. La separación del desplazador y el pistón de potencia también permite un diseño más robusto y confiable.
- Mayor durabilidad: debido a la menor complejidad mecánica y la reducción de tensiones, los motores Gamma tienden a ser más duraderos y necesitan menos mantenimiento en comparación con los motores tipo Alfa.

Algunas desventajas que presentan este tipo de motor son:

- Presentan baja relación de compresión
- Sistema de enfriamiento necesario: en algunos casos se requiere el uso de un buen sistema de enfriamiento en el extremo frío del cilindro del desplazador. Esto puede añadir cierta complejidad y coste al diseño general.
- Volumen muerto más alto: aunque esta configuración del motor es mecánicamente más eficiente que las versiones Alfa y Beta, tiene volúmenes muertos más altos.

En conclusión, la configuración Gamma resulta la más adecuada para el presente estudio, ya que, aunque presenta un mayor volumen muerto que las configuraciones Alfa y Beta, ofrece una operación más estable, una mejor separación térmica entre las zonas caliente y fría, y una mayor eficiencia global en aplicaciones de pequeña escala.(Giannakakis et al., 2017).

5.3 Configuración seleccionada

Una vez expuesta toda la información recopilada acerca de las tres principales configuraciones de los motores Stirling, se procede a seleccionar la configuración que se va a utilizar en el desarrollo del objetivo de este trabajo de grado.

La configuración seleccionada es la del motor Stirling tipo Gamma, esto teniendo en cuenta que de las tres configuraciones expuestas es la que mayor porcentaje de eficiencia puede llegar a tener. Además, esta configuración cuenta con la ventaja de tener mayor durabilidad y necesitar menos mantenimiento.

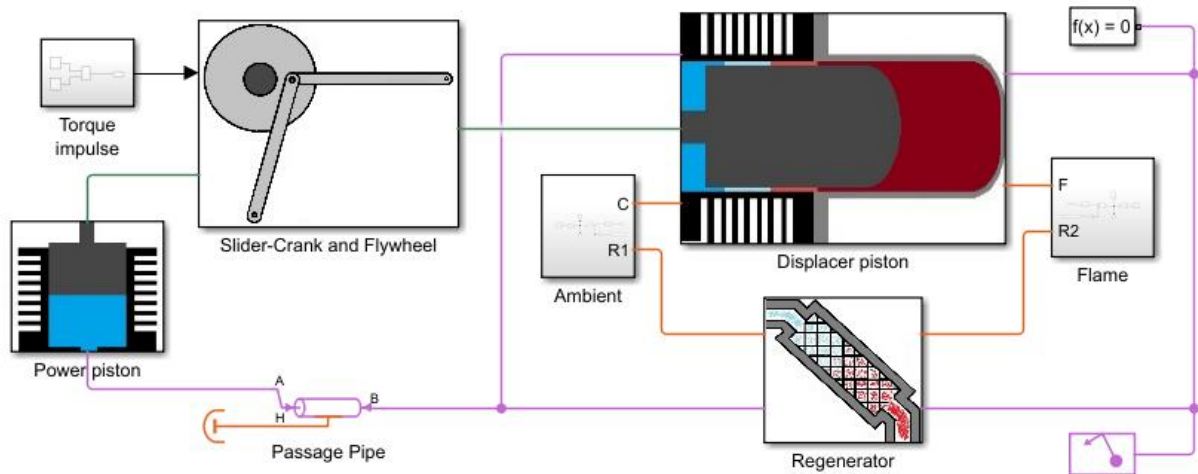
5.3.1 Parametrización y simulación del proceso

Para realizar la simulación del proceso, se decide utilizar el modelo de motor Stirling tipo Gamma desarrollado por Matlab/Simulink.

En la figura 14 se puede ver el entorno gráfico del motor Stirling tipo gamma en Simulink.

Figura 14

Motor Stirling tipo Gamma en Simulink.



Tomada de: (The MathWorks, Inc., 2022)

El funcionamiento del modelo tiene las siguientes consideraciones: utiliza aire como fluido de trabajo, la temperatura del punto caliente va a resultar de la combustión del biogás producido por los desechos de los cerdos. Mientras que el punto frío va a ser la temperatura ambiente del lugar.

Este modelo no usa “metros cúbicos de biogás por día” como un parámetro de entrada directo. El modelo se alimenta con valores de temperaturas, presiones y volúmenes. Por tanto, para

determinar las condiciones de operación del motor, resulta necesario estimar la temperatura máxima que puede alcanzar la combustión del biogás disponible y cuanta potencia térmica hay disponible.

En este orden de ideas, lo primero que se calcula es el poder calorífico inferior del biogás que se tiene, $PCI_{Biogás}$. Que corresponde a la multiplicación de la fracción volumétrica de metano φ_{CH_4} , con el poder calorífico inferior del metano puro.

$$PCI_{Biogás} = \varphi_{CH_4} * PCI_{CH_4}$$

$$PCI_{Biogás} = 0,65 * 35,8 MJ/m^3$$

$$PCI_{Biogás} = 23,27 MJ/m^3$$

Ahora se realiza la conversión de MJ a kWh:

$$1 kWh = 3,6 MJ$$

$$1 MJ = \frac{1}{3,6} kWh$$

Por tanto,

$$kWh \text{ por } m^3 = \frac{PCI_{Biogás}}{3,6}$$

$$kWh \text{ por } m^3 = \frac{23,27}{3,6}$$

$$PCI_{Biogás} \approx 6,4639 kWh/m^3$$

De esta forma, ahora es posible obtener la energía térmica disponible por día, $E_{Th,d}$. Y corresponde al volumen diario disponible V_d , multiplicado por el poder calorífico del biogás.

$$E_{Th,d} = V_d * PCI_{Biogás}$$

$$E_{Th,d} = 12 m^3 * 6,4639 \frac{kWh}{m^3}$$

$$E_{Th,d} = 77,5667 kWh$$

El cálculo del caudal volumétrico durante la combustión corresponde a la quema del volumen de biogás disponible sobre el tiempo en el que se quema. De esta forma se tiene:

$$\dot{V} = \frac{V_d}{t_{burn}}$$

$$\dot{V} = \frac{12 \text{ m}^3}{12 \text{ h}} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$$

Finalmente, para obtener la potencia térmica media Q_{th} basta con dividir la energía térmica disponible durante el día, en el tiempo que se quema el biogás.

$$Q_{th} = \frac{E_{Th,d}}{t_{burn}} = \frac{77,5667}{12}$$

$$Q_{th} \approx 6,464 \text{ kW}$$

La temperatura adiabática de la llama, corresponde al valor teórico que se obtiene bajo el supuesto de combustión completa, sin pérdidas de calor hacia el entorno y considerando únicamente las propiedades termodinámicas de los productos de la reacción. En este trabajo el cálculo se realiza mediante un método de aproximación, en el cual se emplean valores medios constantes de la capacidad calorífica molar (c_p) de los gases, lo que permite obtener una primera estimación del rango de temperatura alcanzable y, con ello, establecer un límite superior para el diseño y dimensionamiento del sistema de conversión energética.

- Base: cálculo por 1 m³ de biogás
- Composición: 65% CH₄, 35% CO₂ (volumétrico)
- Gas en condiciones normales ($V_m = 22,414 \text{ L/mol} = 0,022414 \text{ m}^3/\text{mol}$)
- Entalpía de combustión molar (metano): $\Delta H_{comb,CH_4} = -802,3 \text{ kJ/mol}$, valor absoluto utilizado = 802,3 kJ/mol.
- Temperatura inicial: $T_0 = 15^\circ\text{C} = 288,15 \text{ }^\circ\text{K}$

DISEÑO CONCEPTUAL DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS 42

- Enfoque: combustión estequiométrica con aire ($O_2 + N_2$, razón $N_2/O_2 \approx 3,7619$ por mol de O_2).
- Aproximación principal: usar un valor medio constante de c_p por mol para la mezcla de productos (40-50 J/(mol*K)).

Moles en 1 m³ de gas (base molar)

$$n = \frac{1 \text{ m}^3}{V_m} = \frac{1}{0,022414} = 44,6149 \text{ mol}$$

Moles de CH₄ por m³

$$n_{CH_4} = \varphi_{CH_4} * n = 0,65 * 44,6149 = 28,9997 \text{ mol}$$

Energía liberada por 1 m³ (Q)

$$Q = n_{CH_4} * \Delta H_{comb,CH_4} = 28,9997 * 802,3 = 23266,4852 \text{ kJ}$$

Estequiometría y moles de productos por 1 m³, para 1 mol de biogás (base molar):

- CH₄ = 0,65 mol – consume O₂ = 0,65*2 = 1,30 mol O₂
- Aire asociado: N₂ = 1,30 * 3,7619 = 4,89047 mol N₂

Productos por 1 mol de biogás:

- CO₂ = 0,65+0,35 = 1 mol
- H₂O = 0,65*2= 1,30 mol
- N₂ ≈ 4,89047 mol

Escalando a 1 m³ (multiplicar por $n = 44,6149$):

$$n_{CO_2} = 1 * 44,6149 = 44,6149 \text{ mol}$$

$$n_{H_2O} = 1,30 * 44,6149 = 57,9994 \text{ mol}$$

$$n_{N_2} = 4,89047 * 44,6149 = 218,1881 \text{ mol}$$

Suma total de productos:

$$n_{\text{productos}} = 1 * 44,6149 + 57,9994 + 218,1881 = 320,8026 \text{ mol}$$

Balance energético simplificado (c_p constante)

Planteamiento: toda la energía liberada (Q) eleva la entalpía de los productos desde T_0 hasta T_{ad} .

Con c_p medio constante por mol:

$$Q = \left(\sum_1 n_i \right) c_p \Delta T$$

Donde $\Delta T = T_{ad} - T_0$ y c_p es la capacidad calorífica molar media. Re ordenando:

$$\Delta T = \frac{Q}{n_{\text{productos}} * c_p} \rightarrow T_{ad} = T_0 + \Delta T$$

Ahora, cálculos numéricos en los casos de $c_p = 40, 45, 50 \text{ J}/(\text{mol} * \text{K})$. Primero el denominador (capacidad térmica total de los productos) en kJ/K:

$$C_{\text{total}} = n_{\text{productos}} * \frac{c_p}{1000} \text{ (kJ/K)}$$

- Para $c_p = 50 \text{ J}/(\text{mol} * \text{K})$:

$$C_{\text{total}} = 320,8026 * \frac{50}{1000} = 16,0401 \text{ (kJ/K)}$$

$$\Delta T = \frac{23266,4852}{16,0401} = 1450,5171 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_{ad} = 288,15 + 1450,5171 = 1738,6671 \text{ } ^\circ\text{K} = 1465,517^\circ\text{C}$$

- Para $c_p = 45 \text{ J}/(\text{mol} * \text{K})$:

$$C_{\text{total}} = 320,8026 * \frac{45}{1000} = 14,4361 \text{ (kJ/K)}$$

$$\Delta T = \frac{23266,4852}{14,4361} = 1611,6857 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_{ad} = 288,15 + 1611,6857 = 1899,8357 \text{ } ^\circ\text{K} = 1626,686^\circ\text{C}$$

- Para $c_p = 40 \text{ J}/(\text{mol} * \text{K})$:

$$C_{total} = 320,8026 * \frac{40}{1000} = 12,8321 \text{ (kJ/K)}$$

$$\Delta T = \frac{23266,4852}{12,8321} = 1813,1464 \text{ } ^\circ K$$

$$T_{ad} = 288,15 + 1813,1464 = 2101,2964 \text{ } ^\circ K = 1828.146^\circ C$$

De esta manera,

$$T_{ad} \approx 1740 \text{ } ^\circ K \text{ (si } c_p = 50) \text{ a } 2100 \text{ } ^\circ K \text{ (si } c_p = 40)$$

En $^\circ C$ aproximadamente 1465 $^\circ C$ y 1828 $^\circ C$.

La mayor fuente de incertidumbre está en el valor de c_p promedio para los productos a alta temperatura, porque c_p aumenta con la temperatura (no es constante). A altas temperaturas es mayor, reduciendo la T_{ad} . Además, es importante tener en cuenta que estos resultados fueron obtenidos asumiendo combustión completa y adiabática, es decir, sin pérdidas por radiación, convección o calor latente, ni efectos de humedad adicional. Es un límite teórico.

Un valor realista y conservador para la temperatura que alcanza el intercambiador o cabeza caliente del motor sería 1000 $^\circ K$ ($\approx 727 \text{ } ^\circ C$) (Ipci, 2020).

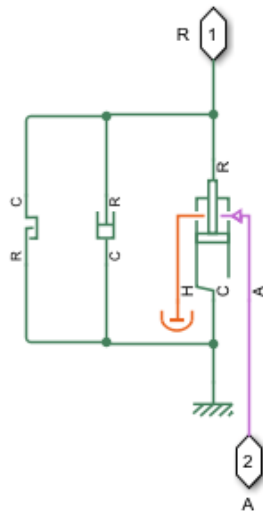
Una vez conocida la potencia térmica disponible y la temperatura máxima que puede alcanzar el biogás al hacer combustión, se identifican los parámetros claves para ajustar el motor Stirling en los scripts de Matlab, estos parámetros se clasifican principalmente en dos tipos, estos son, parámetros termodinámicos y parámetros geométricos.

El motor Stirling tipo gamma tiene un pistón desplazador y un pistón de potencia en cilindros diferentes, lo que permite una separación completa entre el intercambiador de calor de la zona caliente y el intercambiador de calor de la zona fría. El pistón desplazador se mueve en el volumen asociado con el lado caliente y el pistón de potencia se mueve en el volumen de compresión asociado al lado frío.

En las figuras 15 y 16 se puede observar el entorno gráfico del pistón de potencia y el pistón desplazador en Simulink. Mientras que en la Figura 17 se ve la manivela deslizante y volante.

Figura 15

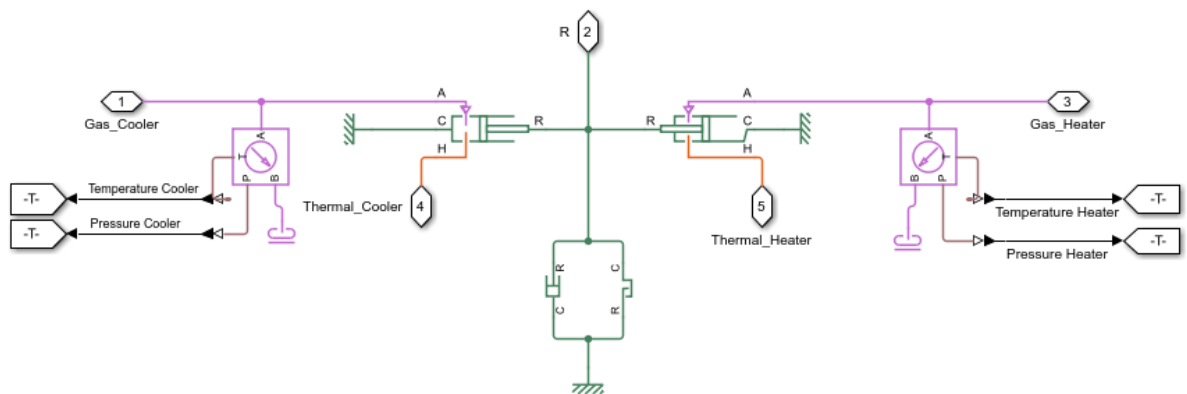
Pistón de potencia en Simulink.



Tomada de: (The MathWorks, Inc., 2022)

Figura 16

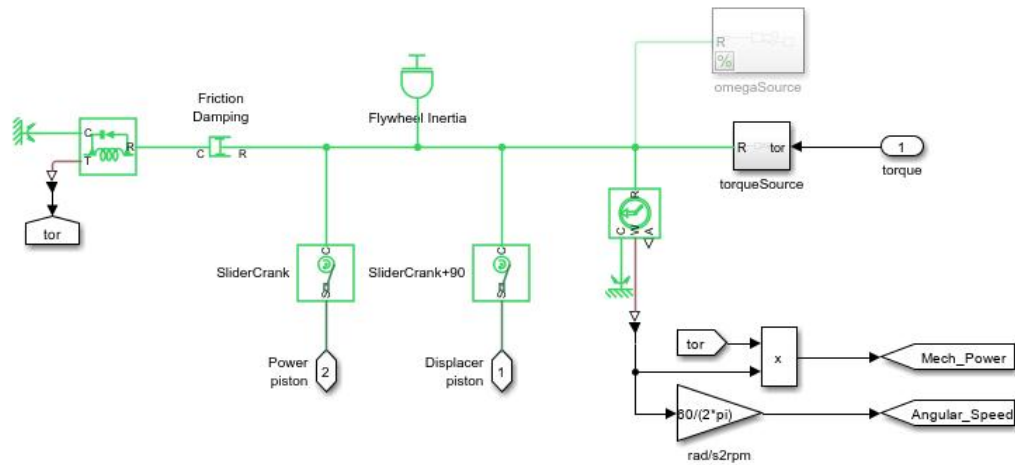
Pistón desplazador en Simulink.



Tomada de: (The MathWorks, Inc., 2022)

Figura 17

Manivela deslizante y volante en Simulink.



Tomada de: (The MathWorks, Inc., 2022)

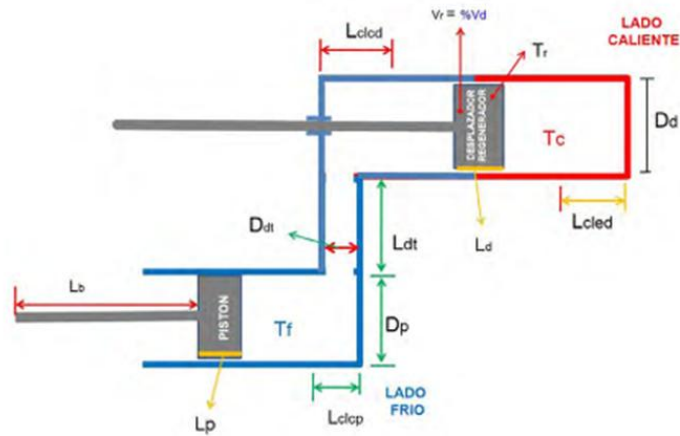
El volumen que se encuentra en el cilindro caliente y delante del desplazador es considerado como volumen de expansión y se supone a una misma temperatura T_c . El volumen que comprende desde el cilindro caliente por la parte posterior del desplazador hasta el volumen barrido por el pistón se considera volumen de compresión y se supone a una misma temperatura T_f .

Los parámetros térmicos y geométricos del motor, definen las variables que son los datos de entrada, entre estos se encuentran las temperaturas, las dimensiones de distintos elementos que conforman las zonas donde se realiza el intercambio de calor.

La Figura 18 permite ver los elementos y las zonas donde se desarrollan los procesos de intercambios de calor y los desplazamientos de los pistones.

Figura 18

Zona interna motor Stirling tipo Gamma.



T_f = temperatura del lado frío.

T_c = temperatura del lado caliente.

D_d = diámetro del elemento desplazador.

D_p = diámetro del pistón en el lado frío.

L_{dt} = longitud del ducto que une los cilindros.

L_{cled} = longitud del volumen muerto en la zona de expansión o lado caliente del desplazador.

L_{clcd} = longitud del volumen muerto en la zona de compresión al lado del desplazador o lado frío del desplazador.

L_{clcp} = longitud del volumen muerto en la zona del pistón.

$\%V_d$ = porcentaje del volumen del desplazador ocupado por el regenerador.

5.3.2 Ajuste de la simulación

Los datos relacionados a las temperaturas del punto caliente y punto frío, se obtienen de acuerdo a las características del gas que se tiene y la temperatura en el sitio donde se encuentra el digestor. Mientras que los datos geométricos corresponden a la configuración inicial que trae el modelo por defecto.

1. $geometry.displacer_piston.radius = 30 \cdot 10^{-3}$ m: **Radio del pistón desplazador**. Este valor, junto con la longitud de la carrera, define el volumen de desplazamiento del pistón.
2. $geometry.displacer_piston.radius_head = 29,223 \cdot 10^{-3}$ m: **Radio de la cabeza del pistón desplazador**. La diferencia entre este radio y el radio del pistón crea un espacio anular para el gas.
3. $geometry.power_piston.radius = 30,072 \cdot 10^{-3}$ m: **Radio del pistón de potencia**. Es el pistón que convierte el trabajo del gas en energía mecánica.

Mecanismo de Biela-Manivela

1. $crank_wheel.slidercrank_disp.crank_radius = 11,574 \cdot 10^{-3}$ m; **Radio de la manivela del desplazador**. Es la mitad de la carrera del pistón. Este es un parámetro clave para el volumen de desplazamiento.
2. $crank_wheel.slidercrank_pow.crank_radius = 19,8529 \cdot 10^{-3}$ m; **Radio de la manivela del pistón de potencia**.
3. $crank_wheel.slidercrank_disp.rod_length = 90 \cdot 10^{-3}$ m; **Longitud de la biela** para el pistón desplazador.

Ambiente y Enfriador (ambient)

Este bloque define las condiciones de temperatura y presión del entorno, así como las características del sistema de enfriamiento.

1. $ambient.Temperature = 288,15$; **Temperatura ambiente** en Kelvin, que es la temperatura del foco frío también.
2. $ambient.pext = 0,101325$; **Presión externa** en MPa (0,101325 MPa es igual a 101,325 kPa, o 1 atmósfera).

Estado Inicial

Esta sección establece las condiciones de inicio de la simulación.

1. `state_init.T0 = 288,15`; **Temperatura inicial** del gas en el interior del motor, igual a la temperatura ambiente.
2. `state_init.p0 = 0,4298*ambient.pext`; **Presión inicial** del gas. Este valor es una fracción de la presión externa.

Quemador y Calentador (flame)

Aquí se establece la temperatura de la fuente de calor.

1. `flame.Temperature = 1000`; **Temperatura de la llama** del quemador en Kelvin (aproximadamente 727 °C), que actúa como la fuente de calor externa.

Parámetros de Impulso (impulse_torque)

Este último bloque simula un par de impulso para iniciar el motor, si es que no arranca por sí solo.

1. `impulse_torque.t_start` y `impulse_torque.t_end`: Definen el **intervalo de tiempo** en el que se aplica el impulso.

5.3.3 Resultados

A continuación, se observan los resultados de la primera simulación; fueron 20 segundos de ejecución. El motor operó a 971,4653 rpm, con un trabajo por ciclo de 0,72849J y una absorción de calor por ciclo de 6,5746J. Esto se tradujo en una potencia térmica absorbida de 106,4498W y una potencia mecánica de salida de 11,7951W, lo que corresponde a una eficiencia termodinámica del 11,08%.

Work per cycle: 0,72849J

Heat absorption per cycle: 6,5746J

Thermodynamic efficiency: 11,08%

DISEÑO CONCEPTUAL DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS 50

Shaft speed: 971,4653rpm

Mechanical power: 11,7951W

Thermal power absorbed: 106,4498W

La Figura 19 permite observar el comportamiento de la velocidad angular (rpm) y la potencia mecánica (W) con los parámetros establecidos anteriormente. Mientras que la Figura 20 representa gráficamente el ciclo de presión vs volumen del último ciclo de la simulación.

Figura 19

Velocidad y potencia prueba 1.

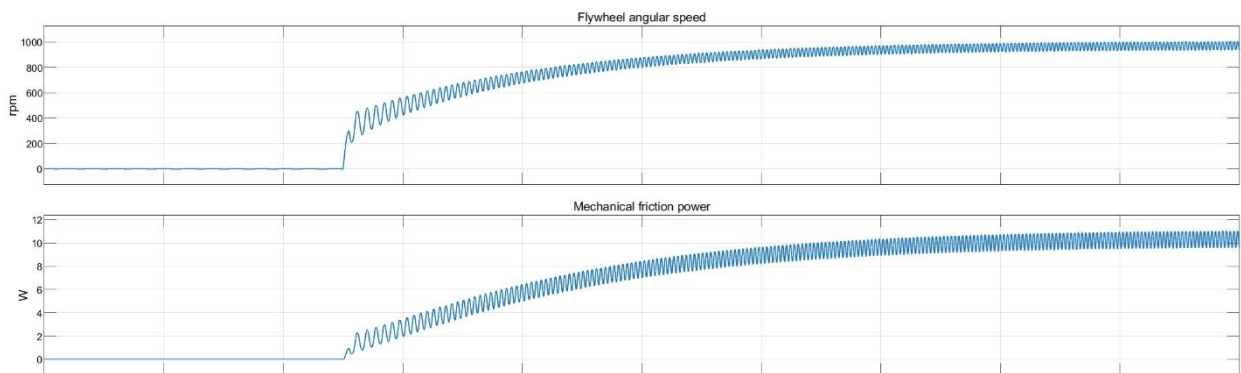
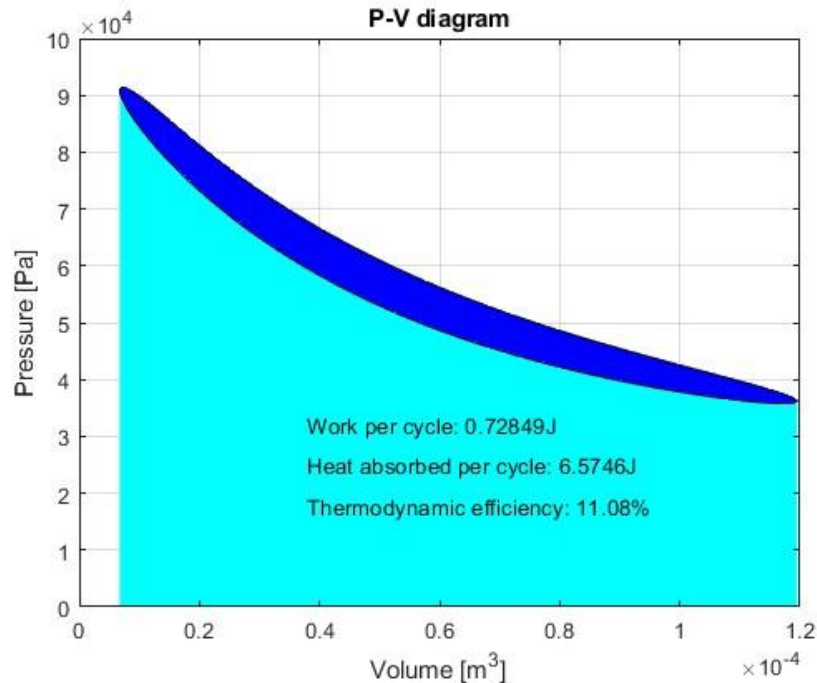


Figura 20

Diagrama presión vs volumen prueba 1.



Estos resultados indican que, con la geometría y condiciones térmicas empleadas, el sistema está limitado por la tasa efectiva de transferencia de calor al gas de trabajo y por la presión de operación (valores bajos por defecto en el modelo). Para escalar la potencia hacia rangos de mayor interés (centenas de W o kW) es necesario, además de aumentar el volumen desplazado, optimizar el intercambiador térmico (mayor coeficiente y área efectiva), aumentar la presión de trabajo y mejorar la regeneración; de otro modo la capacidad de intercambio térmico no seguirá el ritmo del incremento volumétrico y la potencia no escalará de forma proporcional.

Con lo anterior en mente, se realizan ajustes que incluyen, aumentar levemente la presión del gas de trabajo (es importante resaltar que después de realizado dicho aumento, la presión del gas de trabajo no supera el valor de la presión atmosférica, por tanto, no hay necesidad de usar un compresor). La geometría de las partes móviles del motor, la ampliación de las áreas donde ocurren las transferencias de calor, así como también, el aumento en los coeficientes de

DISEÑO CONCEPTUAL DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS 52

convección para mejorar el intercambio térmico. Todos estos cambios se pueden observar en el script de Matlab llamado “GammaStirlingEngineParams.m”, script que se encuentra dentro de los anexos de este proyecto. Efectuados esos cambios y ajustes, los resultados obtenidos son los siguientes:

Work per cycle: 92,4259J

Heat absorption per cycle: 726,7119J

Thermodynamic efficiency: 12,72%

Shaft speed: 411,0772rpm

Mechanical power: 633,2361W

Thermal power absorbed: 4978,9112W

La Figura 21 muestra el comportamiento de la velocidad angular (rpm) y la potencia mecánica (W), una vez ajustados los parámetros. Y la Figura 22 el último ciclo de presión vs volumen de la simulación 2.

Figura 21

Velocidad y potencia prueba 2.

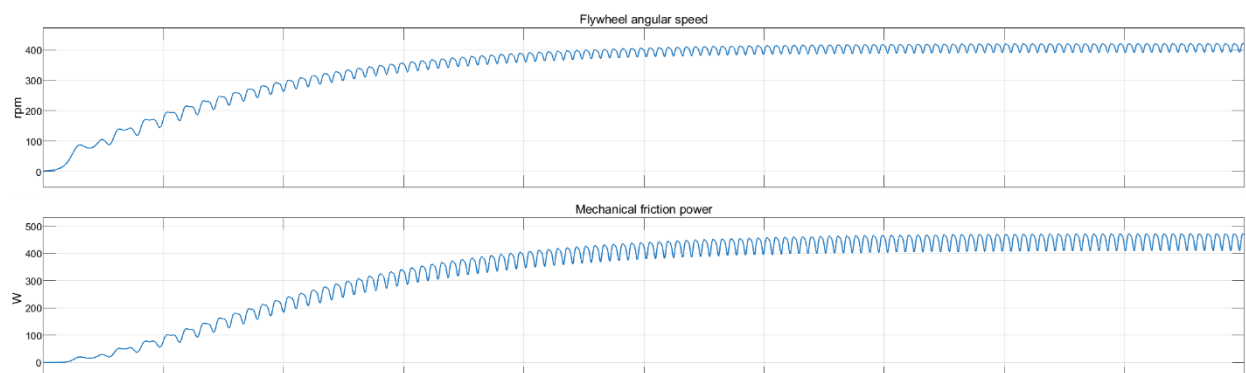
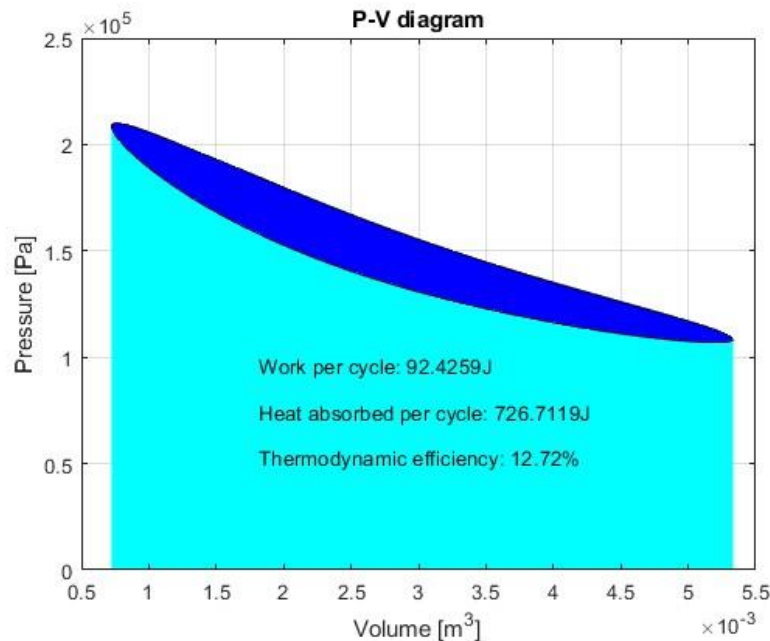


Figura 22*Diagrama presión vs volumen prueba 2.*

Los resultados muestran una potencia mecánica de 633,2362 W, con una eficiencia termodinámica de 12,72% y una velocidad de operación cercana a 411 rpm. Además, la potencia térmica absorbida alcanza aproximadamente los 5 kW, valor cercano a la potencia que se tiene disponible. En esta simulación, el incremento geométrico permitió pasar de decenas de vatios a varios cientos de vatios, lo que representa un orden de magnitud más cercano a aplicaciones prácticas de micro generación de energía. Sin embargo, la eficiencia no se incrementó de forma proporcional, lo cual concuerda con la teoría, ya que, al aumentar las dimensiones, las pérdidas térmicas y mecánicas también se amplifican, y la transferencia de calor se convierte en el factor limitante del rendimiento. Otro aspecto relevante es que la potencia específica aún es relativamente baja comparada con motores Stirling comerciales presurizados (que generalmente operan con presiones entre 5 y 50 bar). Esto indica que, para avanzar hacia un prototipo de mayor aplicabilidad, sería necesario incrementar la presión de operación interna, optimizar el

regenerador y los intercambiadores de calor. Tales ajustes permitirían mejorar la densidad de potencia y la eficiencia global.

Una vez obtenida la potencia mecánica en el eje del motor Stirling (P_{mec}), es necesario considerar las etapas de conversión para estimar la potencia eléctrica neta entregable. La potencia eléctrica útil se calcula mediante:

$$P_{el} = \eta_{gen} \eta_{trans} \eta_{elec} P_{mec}$$

Donde η_{gen} corresponde a la eficiencia del generador eléctrico, η_{trans} a la eficiencia de la transmisión mecánica y η_{elec} a la eficiencia de la electrónica de potencia. Cada etapa introduce pérdidas por fricción, pérdidas eléctricas y conversión, por lo cual es necesario incluirlas en la estimación.

Para este caso se adoptaron valores típicos y conservadores reportados en la literatura para sistemas de pequeña escala.

$$\eta_{gen} = 0,9 \text{ (Generador síncrono de imanes permanentes)}$$

$$\eta_{trans} = 0,97 \text{ (Acoplamiento directo con pérdidas mínimas)}$$

$$\eta_{elec} = 0,95 \text{ (Rectificador e inversor de alta eficiencia)}$$

De esta manera, con el valor de potencia obtenido en la simulación:

$$P_{mec} = 633,2361 \text{ W}$$

La potencia eléctrica neta es:

$$P_{el} = 0,9 * 0,97 * 0,95 * 633,2361$$

$$P_{el} \approx 525 \text{ W}$$

Este valor es potencia instantánea. Eso significa que la energía generada durante 1 hora es:

$$E_{1h} \approx 0,525 \text{ kWh}$$

O si funciona durante 12 horas seguidas:

$$E_{12h} \approx 6,3 \text{ kWh}$$

5.3.3.1 Discusión.

El sistema estudiado permite convertir la energía contenida en el biogás de origen porcino $E_{Th,d} = 77,5667 \text{ kWh}$, en aproximadamente $6,3 \text{ kWh}$ eléctricos, lo que corresponde a una eficiencia global cercana al 8,12%. Valores consistentes que se encuentran dentro del rango reportado por la literatura para motores Stirling de pequeña escala acoplados a generadores eléctricos, cuyas eficiencias oscilan entre 5% y 12%.

La literatura especializada señala que la eficiencia de los motores Stirling puede incrementarse mediante tres líneas principales de optimización: (1) aumento de la presión de trabajo, ya que la potencia escala de manera casi proporcional con la presión media del gas, esto exige un diseño mecánico robusto y materiales que soporten mayores esfuerzos; (2) mejora del regenerador, considerado el “corazón” del motor, cuya efectividad incide directamente en la capacidad de reutilizar el calor y reducir pérdidas; y (3) optimización de los intercambiadores de calor, aumentando el área efectiva y los coeficientes de transferencia, lo que permite una mejor absorción del calor del biogás y una evacuación más eficiente hacia la zona fría.

De este modo, aunque el sistema estudiado demuestra la viabilidad técnica de la conversión energética del biogás, también revela el amplio margen de mejora existente. En investigaciones futuras, la combinación de mayor presión de operación, regeneradores más efectivos y un diseño avanzado de intercambiadores de calor podría elevar la eficiencia global del sistema. Además, el potencial del motor Stirling para operar como sistema de cogeneración (CHP) representa otra gran oportunidad, ya que permite aprovechar simultáneamente la energía térmica residual para calefacción, secado o procesos agrícolas, aumentando la competitividad de esta tecnología frente a otras alternativas de aprovechamiento del biogás.

6. Conclusiones

El trabajo presentó el diseño conceptual y la evaluación de la viabilidad técnica de generación de energía eléctrica, a partir del biogás producido en un digestor tubular. Mediante la modelación de un motor Stirling tipo gamma (modelo en MATLAB/Simscape) y la caracterización del recurso (biogás: 65% CH_4 , 35% CO_2 , 12 m^3 diarios), dando así cumplimiento a los objetivos propuestos: selección de una tecnología para el aprovechamiento (motor Stirling tipo gamma) y simulación de la conversión de volumen de biogás a potencia eléctrica.

La simulación final del sistema, tras iteraciones de optimización geométrica y térmica, arrojó una potencia mecánica en el eje de aproximadamente 633 W. Aplicando pérdidas conservadoras en la cadena de conversión (generador síncrono de imanes permanentes, transmisión y electrónica) se estimó una potencia eléctrica neta de ≈ 525 W. La potencia química disponible por la combustión del biogás, con un caudal de 1 m^3/h es de $\approx 6,46$ kW, lo que conduce a una eficiencia global biogás – electricidad de $\approx 8,1\%$.

Los valores de eficiencia y potencia obtenidos se sitúan en rangos coherentes con la literatura para motores Stirling experimentales y prototipos de pequeña escala con eficiencias globales típicas entre el 5% y el 12%. Esto respalda la plausibilidad de los resultados y valida, al menos a nivel conceptual y de diseño, la viabilidad técnica del aprovechamiento energético del biogás con esta tecnología.

Las mayores pérdidas identificadas provienen de la transferencia de calor limitada entre la llama y el fluido de trabajo (resistencias térmicas, masa térmica de cabezal). Además, el modelo incorpora simplificaciones, por ejemplo, propiedades promedio constantes de los gases y parámetros empíricos para coeficientes convectivos, que, si bien son adecuados para análisis

comparativos y de sensibilidad, constituyen una limitación para predicciones de diseño final sin prototipo experimental.

Para aumentar la eficiencia y la potencia utilizable se recomienda, incrementar la presión de trabajo del fluido siempre que el diseño mecánico lo permita, ya que la potencia por ciclo aumenta aproximadamente con la presión media. Optimizar el regenerador (efectividad, área de intercambio, materiales) para recuperar mayor parte del calor entre semi periodos y reducir las pérdidas. Mejorar los intercambiadores de calor (mayor área efectiva, mejores coeficientes, reducción de masas térmicas innecesarias) para aumentar la fracción de calor absorbido por el fluido de trabajo. Reducción de volúmenes muertos y ajuste detallado de geometría (volumen de barrido y relación calentador/enfriador) para maximizar el trabajo por ciclo sin caer en condiciones no físicas. Estas acciones combinadas tienen el potencial de elevar la eficiencia global hacia valores mayores que mejorarían significativamente la competitividad del sistema frente a alternativas de conversión de biogás.

Antes de una implementación real, se recomienda la construcción de un prototipo piloto para validar el rendimiento real del regenerador y los intercambiadores, y la estabilidad de operación a la presión seleccionada. La validación experimental permitirá ajustar parámetros empíricos y confirmar o corregir las predicciones del modelo.

Referencias Bibliográficas

- Amaya, Á. P. (2015). *Motor Stirling: El conjunto casero que revolucionó las mecánicas de combustión externa*.
- Aparicio, A. A. (2015). Biometano: Alternativa sostenible del gas natural. *Met & Flu*, 60-70.
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., y Levy, A. (2017). *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico práctico*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Duato, A. (3 de Junio de 2016). *Blog SEAS*. Web de SEAS: <https://www.seas.es/blog/disenomecanico/tipos-de-motor-stirling/>
- Equipo Bioguía. (01 de Marzo de 2013). *BIOGUÍA*. BIOGUÍA:
<https://www.bioguia.com/notas/biodigestores>
- Fondo nacional de la porcicultura. (2020). *Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible*.
<https://economiacircular.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/09/guia-biogas-sector-porcicola-ministerio-de-ambiente-desarrollo-sostenible.pdf>
- Giannakakis, G., Smith, H. F., Taylor, J., y Wilson, J. (2017). Factors Influencing the Thermodynamic Efficiency of Stirling Engines. *UTS ePress, IV*.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5130/pamr.v4i0.1459>
- Instrumentos de medición. (2025). *Instrumentos de medición*. instrumentos de medición org:
<https://instrumentosdemedicion.org/general/turbina-de-gas/>
- Ipci, D. (2020). *Thermodynamic analysis of a gamma-type stirlingengine driven by Scotch Yoke mechanism*. International Journal of Green Energy.
<https://doi.org/10.1080/15435075.2020.1831512>

- IRENA. (Marzo de 2018). *International Renewable Energy Agency (IRENA)*. International Renewable Energy Agency (IRENA):
<https://www.irena.org/publications/2017/Mar/Biogas-for-road-vehicles-Technology-brief>
- Puech, P., y Tishkova, V. (2011). *Thermodynamic analysis of a Stirling engine including regenerator dead volume*. ELSEVIER.
- Quesada, R., salas, N., Arguedas, M., y Botero, R. (2011). *Generación de energía eléctrica a partir de biogás*. Revista Tierra Tropical.
- Smithsonian Institution. (2020). *Smithsonian museum of american history*.
<https://americanhistory.si.edu/fuelcells/basics.htm>
- The MathWorks, Inc. (2022). *Gamma Stirling Engine*.
- UC Davis Biomass Collaborative; National Risk Management Research Lab. (2016). *Evaluating the Air Quality, Climate & Economic Impacts of Biogas Management*. United States Environmental Protection Agency.
- Unidad administrativa especial de servicios públicos. (Agosto de 2021). *Portal único del estado colombiano*. Unidad administrativa especial de servicios públicos:
<https://www.uaesp.gov.co/noticias/dona-juana-se-aprovechan-los-gases-los-residuos>
- Walker, G. (1980). *Stirling Engines*. Oxford University press.
- Werner, U., Stohr, U., y Hees, N. (1989). *Biogas plants in animal husbandry*. GTZ (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit).

Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice A. Código 'GammaStirlingEngineExample' en Matlab/Simscape.