

**EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE UN MOTOR
STIRLING ACCIONADO POR FIBRA DEL COCO EN EL DEPARTAMENTO DE
CÓRDOBA.**

AUTORES:

LUIS FELIPE CONEO LUNA

LUIS ALFREDO LEÓN AGUILAR

MONOGRAFÍA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR

ING. MIGUEL DORIA OVIEDO

CODIRECTOR

ING. TAYLOR DE JESUS DE LA VEGA GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA – CÓRDOBA

2021

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, le damos gracias a Dios por brindarnos la oportunidad de culminar con éxito este proyecto. De igual manera a nuestras familias y amigos que nos acompañaron en todo este proceso y por último agradecerles a los ingenieros que con su disposición y apoyo nos brindaron herramientas para finalizar de la mejor manera nuestro diplomado y monografía.

Tabla de contenido

1	Resumen	8
2	Introducción.....	10
3	Objetivos.....	12
	3.1 Objetivo General.....	12
	3.2 Objetivos Específicos	12
4	Desarrollo del tema.....	13
	4.1 Biomasa	13
	4.1.1 Tipos De Biomasa.....	14
	4.1.2 Características Térmicas De La Biomasa.	14
	4.2 Motor Stirling	15
	Importancia del uso del motor Stirling:	15
	Principios de funcionamiento del motor Stirling.....	16
	Tipos de motores Stirling	16
	4.3.3.1 Configuración Alfa	16
	4.3.3.2 Configuración Beta	17
	4.3.3.3 Configuración Gamma.....	18
5	Estado Del Arte	18
6	Metodología.....	24
	6.2 Caracterización de la biomasa	25

6.3	Parametrización y Simulación del modelo termodinámico	25
6.4	Viabilidad Ambiental y Económica.....	28
7	Resultados.....	29
7.1	Caracterización de la biomasa	29
7.2	Combustión.....	30
8.1	Simulación del modelo termodinámico.....	31
8.2	Eficiencia	35
8.3	Viabilidad Ambiental y Costos Económicos.....	36
9.	Conclusiones.....	37
10	Referencias Bibliográficas.....	39

Lista de figuras

Figura 1. biomasa cascara de coco. Fuente: características de la biomasa.....	13
Figura 2. Esquema del motor Stirling tipo alfa	17
Figura 3. Esquema del motor Stirling tipo beta.....	17
Figura 4. Esquema del motor Stirling tipo gamma.....	18
Figura 5. Principio de funcionamiento de un motor Stirling (b) Diagramas P - V y T - S para ciclos ideales de Stirling y Carnot.	22
Figura 6. Parámetros establecidos para la simulación del modelo termodinámico.....	26
Figura 7. Modelo Termodinámico del motor Stirling en el software Matlab.....	27
Figura 8. El pistón del desplazador.	27
Figura 9. Regenerador.	27
Figura 10. pistón de potencia.....	28
Figura 11. manivelas deslizantes y el volante.	28
Figura 12. Código en EES para cálculo de la combustión con exceso de aire.	30
Figura 13. Relación de la temperatura de combustión VS % de aire.	31
Figura 14. Resultado de la simulación para una temperatura 732 K, se obtuvo una potencia 3,97 kw	32
Figura 15. Resultado de la simulación para una temperatura 754 K, se obtuvo una potencia 4,29 kW	32
Figura 16. Resultado de la simulación para una temperatura 774 K, se obtuvo una potencia 4,42 kW	32

Figura 17. Temperatura de la fuente de calor frente a la potencia de salida.	33
Figura 18. Resultado de la simulación para una temperatura 900 K, con sustancia de trabajo Aire. Potencia obtenida 5,397 kW	33
Figura 19 . Resultado de la simulación para una temperatura 900 K, con sustancia de trabajo Helio. Potencia obtenida 6,138 kW	33
Figura 20. Resultado de la simulación para una temperatura 1200 K, con sustancia de trabajo Aire. Potencia obtenida 7,439 kW	34
Figura 21 Resultado de la simulación para una temperatura 1200 K, con sustancia de trabajo Helio. Potencia obtenida 8,546 kW	34
Figura 22. (a) Eficiencia eléctrica nominal y (b) eficiencia térmica frente a energía eléctrica	35

Lista de tablas

Tabla 1. Pauta ASTM utilizada para el análisis elemental y próximo.	25
Tabla 2. Composiciones químicas de la biomasa.	29
Tabla 3. Datos técnicos y económicos del sistema para generación de energía.....	36

1 Resumen

El desarrollo del siguiente documento presenta un análisis de un modelo termodinámico para un motor Stirling de configuración tipo gamma, el cual utiliza una biomasa como fuente para la generación de energía. Por lo tanto, el potencial de la generación de energía térmica de la biomasa se obtuvo, a partir de las propiedades en la caracterización y la combustión. Para la simulación se utiliza Matlab, que muestra como modelar este tipo de motor para estimar la potencia de salida del motor, con cada una de sus partes y parámetros. El modelo desarrollado tiene una potencia de salida de 4 W, girando a una velocidad superior a 1000 rpm y a partir de una temperatura en el foco caliente promedio de 800 K, el fluido de trabajo para el sistema de refrigeración, es mediante aire. La fuente de calor se obtiene de la combustión de biomasa para este caso fibra de coco, la cual presenta un poder calorífico de 24.29 MJ/kg., el fin de este proyecto es conocer como la integración de la fibra de coco, es una fuente alternativa para la obtención de energía, determinando una potencia entregada por el sistema y conocer los gastos generados para la puesta en funcionamiento, que la implementación de este tipo de tecnología sea amigable con el medio ambiente y económica.

Palabras clave: Fuentes De Energía, Motor Stirling, Matlab, Biomasa.

Abstract

The development of the following document presents an analysis of a thermodynamic model for a Stirling engine with a gamma configuration, which uses biomass as a source for energy generation. Therefore, the potential for the generation of thermal energy from biomass was obtained, from the properties in the characterization and combustion. Matlab is used for the simulation, which shows this type of motor as a model to estimate the motor's output power, with each of its parts and parameters. The model developed has an

output power of 4 W, rotating at a speed higher than 1000 rpm and from an average hot spot temperature of 800 K, the working fluid for the cooling system is by means of air. The heat source is obtained from the combustion of biomass for this case coconut fiber, which presented a calorific value of 24.29 MJ / kg. The purpose of this project is to know how the integration of coconut is an alternative source to obtain energy, determining a power delivered by the system and knowing the expenses generated for the start-up, that the implementation of this type of technology is environmentally friendly and economical.

Keywords: Energy Sources, Stirling Engine, Matlab, Biomass.

2 Introducción

La generación de energía a partir de la biomasa ha tenido una importante participación a nivel mundial debido al incremento en la implementación de proyectos que buscan reemplazar los combustibles fósiles. El progresivo crecimiento en la demanda de energía aumenta la necesidad de ampliar la matriz energética (Planas; & Cárdenas, 2019). Por su aplicación en la actualidad el uso de la biomasa como fuente de energía ha demostrado ser una alternativa interesante, por ser un recurso renovable muy amigable con el medio ambiente y de bajo costo (Epec, 2018). El sector eléctrico en Colombia ha estado tradicionalmente dominado por la generación hidroeléctrica y térmica, con una producción de energía promedio de 70% y 29%, respectivamente, Otras fuentes renovables, como la eólica y la bioenergía, representan el 1% restante de la generación media anual total (Pupo-Roncallo et al., 2020).

El motor Stirling es un motor de combustión externa que funciona con una gran variedad de fuentes energéticas, tales como, la biomasa, energía geotérmica, energía solar térmica y todo tipo de combustibles convencionales, puede trabajar con biocombustible sólido, líquido o gas (Ángel et al., 2019). Este tipo de motor opera de modo volumétrico a través de un ciclo termodinámico en el cual normalmente se utiliza como fluido de trabajo aire, helio o hidrógeno (Medina, 2019). El motor posee las condiciones económicas y técnicas para convertirse en una de las tecnologías más prominentes para ser utilizada en el suministro de energía eléctrica en las regiones donde se pueda aprovechar la biomasa, debido a su característica de ser de combustión externa, puede trabajar con casi cualquier fuente de calor, incluida la quema directa de la biomasa (Herguedas et al., 2012).

A nivel mundial, se destaca la producción de coco en Indonesia como una de las principales con 18,3 millones de toneladas al año. En la lista de producción de coco encontramos países como Filipinas con 15,3 millones; India con 11,9 millones; Brasil con 2,8 millones y Sri Lanka con 2,5 millones, todas estas producciones son anuales. Si bien esta es la palmera más cultivada a nivel mundial en países de Asia, en Colombia aún su desarrollo es muy bajo en comparación con los países líderes productores de coco, Según los últimos datos consolidados por el Ministerio de Agricultura, la producción nacional de coco asciende a 122.768 toneladas, resaltando a Córdoba como segundo departamento en la producción con 23.861 toneladas. De esta manera, la cosecha en Córdoba concentra 19,4% del total y dispone en su territorio de 3.287 hectáreas cultivadas (Cardona, 2018).

La biomasa residual generada en el sector agrícola, está conformada por los subproductos que se generan durante los procesos de recolección y transformación de las cosechas, por este motivo se originan residuos que en muchos casos son una dificultad para los productores (Núñez Camargo, 2012). La inadecuada disposición final de estos residuos genera un impacto ambiental convirtiéndose en una fuente de contaminación, entre los problemas más comunes que encontramos que este tipo de biomasa considerada residuo, usualmente para su disposición final son quemados a cielo abierto ocasionando altos niveles de polución, otra de las formas más comunes en la que se disponen estos residuos es su acumulación en lugares donde después de cierto tiempo generan emisiones por su descomposición, la cual puede terminar en las fuentes hídricas al ser removidas por agentes externos, sumado al hecho de que no generan ningún tipo de valor agregado para el productor y presentan sobrecostos de manejo. Es de suma importancia que estos residuos tengan un proceso que mejore sus características energéticas, manipulación, transporte y almacenamiento, de esta manera, merece especial atención el uso de las biomásas (Berastegui Barranco et al., 2017).

El propósito de este trabajo es realizar un estudio del aprovechamiento energético utilizando una biomasa “fibra de coco”, mediante la simulación de un modelo termodinámico del motor Stirling en el software “Matlab”, con el fin de encontrar el impacto de los principales factores en su desempeño. Hay tres factores que se estudian en el presente trabajo, que son la caracterización de fibra de coco, que permitirá obtener valores de referencia de sus propiedades y la combustión, el desarrollo de los parámetros y del modelo termodinámico para la simulación del ciclo Stirling. Además, esta investigación proporcionará más información que ayudaría más a comprender las características del motor Stirling. las condiciones y parametrizaciones que permitirán el desarrollo de la simulación del modelo termodinámico además de una serie de resultados y conclusiones que se obtuvieron con la realización del desarrollo de este trabajo.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar la generación de energía de un motor Stirling implementando fibra de coco como combustible.

3.2 Objetivos Específicos

- Realizar una caracterización termoquímica de la biomasa con el fin de conocer sus propiedades para el aprovechamiento energético
- Desarrollar un modelo termodinámico del ciclo Stirling, implementando fibra de coco como combustible de trabajo.
- Analizar la viabilidad económica y ambiental del sistema de generación del motor Stirling.

4 Desarrollo del tema

4.1 Biomasa

La biomasa se puede definir como una fuente de energía renovable originada a partir de materia orgánica formada por vía biológica. El contenido energético proviene de la energía solar fijada por los vegetales durante la fotosíntesis, esta energía es liberada una vez se rompen los enlaces de los compuestos orgánicos durante la combustión, produciendo dióxido de carbono y agua. Los productos procedentes de la biomasa usados para fines energéticos se denominan biocombustibles, los cuales pueden ser, biocombustibles sólidos y se utilizan generalmente para fines de generación de energía térmica, eléctrica y combustibles (líquidos, sólidos o gaseosos) (Cabeza, 2016). El departamento de Córdoba es el principal productor de coco en el Caribe Colombiano, (ver figura 1). Para el año 2019, le asignan 2.114 hectáreas con una producción anual de 16.134 toneladas donde nos indica que es una fuente abundante de producción de biomasa en el departamento (MAPA, 2021). El uso responsable que se le puede dar a la biomasa por su abundancia producida en el región se convierte en una fuente amigable con el medio ambiente para la obtención de energía y teniendo presente el poder calorífico de la fibra de coco que es de 16300 kJ/kg se convierte en un atractivo para su aprovechamiento (Hoyos Álvarez et al., 2019).



Figura 1. biomasa cascara de coco. Fuente: características de la biomasa Fuente (Azeta et al., 2021): .

4.1.1 Tipos De Biomasa.

- **Biomasa natural:** recursos generados espontáneamente sin la intervención del hombre y provienen de masas forestales.
- **Biomasa residual:** generada a partir actividades de producción como subproductos; pueden ser transformadas y luego reutilizadas (por ejemplo, estiércol de animales, residuos de cosechas y podas, residuos sólidos orgánicos urbanos, residuos de industrias).
- **Cultivos energéticos:** es aquel cultivo agrícola, forestal o acuático, cuya producción parcial o total se utiliza como materia prima para generar energía aprovechable. En los cultivos específicamente energéticos, teóricamente se aprovecharía el total de su producción, incluidos sus residuos.

4.1.2 Características Térmicas De La Biomasa.

Existen características específicas que determinan el funcionamiento de la biomasa como combustible en la combustión o gasificación o ambas; Entre estas características referentes a la conversión térmica de la biomasa se tiene:

- **Contenido de humedad:** El contenido de humedad es una característica muy determinante en términos de la energía ya que es posible obtener por unidad de biomasa, además de incidir en su manejo. Cuando la biomasa leñosa reduce de modo considerable su contenido de humedad, también reduce significativamente su peso, su volumen y la actividad biológica de agentes externos. Por otra parte, garantiza la reducción de emisiones en la combustión, incrementa el poder calorífico (NREL, 1998).
- **Contenido de ceniza:** Los combustibles sólidos con menor cantidad de ceniza son la mejor opción, ya que lo que depositan en procesos de combustión es menor Tanto la ceniza volátil como las depositadas son elementos importantes a considerar en las unidades de conversión termoquímicos (Oberberger, 2005).
- **Contenido de materia volátil:** Es la parte de la biomasa que se obtiene cuando se calienta la biomasa (hasta 400 a 500°C), donde se descompone en gases volátiles y carbón de leña sólido(Urien, 2013).

- **Composición elemental:** La mayoría de las biomásas está constituida por 50% de carbono (C), 43% de oxígeno(O), 6% de hidrógeno (H), y menos del 1% por varios elementos, el contenido de C e H contribuyen positivamente en el poder calorífico, mientras que el contenido de O lo hace de modo negativo (Oberberger, 2005).
- **Poder calorífico:** el poder calorífico mide el contenido energético de una sustancia combustible y se define como la cantidad de energía liberada por unidad de masa o por unidad de volumen de combustible, cuando este es completamente quemado (Norma ANSI/ASABES593.1 2011).

4.2 Motor Stirling

Importancia del uso del motor Stirling:

Actualmente el mundo viene sufriendo grandes cambios negativos en el medio ambiente producto de la combustión masiva del petróleo y sus derivados, es por ello que tenemos que ver la manera de reemplazar este combustible buscando energías limpias que reduzcan el daño al medio ambiente. Por eso este tipo de motores brindan una fuente de alternativa de obtención de energía, los motores Stirling son una buena alternativa porque son motores de combustión externa, lo cual hace posible regular mejor la combustión y utilizar diferentes formas de energía para su funcionamiento(Magacho et al., 2019). En Colombia, hay personas que carecen de electricidad, que en su gran mayoría habitan en áreas rurales, a estas áreas se les conoce como zonas no interconectadas o ZNI. Éstas se caracterizan por estar localizadas en zonas dispersas, con una densidad poblacional baja y dificultades socio-económicas que no permiten una buena calidad de vida, Las ZNI están en zona rural de 17 departamentos y equivalen al 52% del territorio nacional e incluyen a 90 municipios(Anzures et al., 2018). Por tal motivo, el motor Stirling podría ser usado en dichas zonas donde se cuente con combustibles convencionales o alternativos, generando energía eléctrica a pequeña escala, lo cual permitirá el desarrollo de muchas actividades productivas mejorando la calidad de vida de las personas.

Principios de funcionamiento del motor Stirling

El funcionamiento de este motor es relativamente sencillo y cuenta con pocos elementos en su diseño, en el motor Stirling un gas está confinado en una cámara cerrada, no sale al ambiente. El gas se desplaza de un extremo a otro de la cámara, cuando está en un extremo, una fuente de calor externa lo calienta; esto hace que se expanda y así se produce la fuerza del motor. Una vez que alcanza su máxima expansión, el gas se traslada al otro extremo de la cámara, donde se enfría, lo que provoca que se comprima. Después se lleva nuevamente al extremo caliente para iniciar un nuevo ciclo. Un tambor desplazador mueve el gas entre los dos extremos de la cámara y otro dispositivo, el pistón de potencia, aprovecha la expansión para producir la fuerza del motor (Miguel, 2016).

Tipos de motores Stirling

Existen 3 tipos de configuraciones para el motor Stirling:

4.3.3.1 Configuración Alfa

El motor Stirling tipo Alfa, (ver figura 2) está compuesto de dos pistones ubicados en diferentes cámaras a 90° , de las cuales en una se ubica la fuente de alta temperatura y en la otra el sumidero de baja temperatura; además a este motor se le puede incorporar un medio de regeneración entre la cámara fría y la caliente a fin de aprovechar el calor suministrado. Este tipo de motor entrega una alta potencia debido a su relación de compresión y por lo general ambas bielas se encuentran montadas en el mismo pasador de cigüeñal, lo que hace que el mecanismo de transmisión de potencia sea muy sencillo.

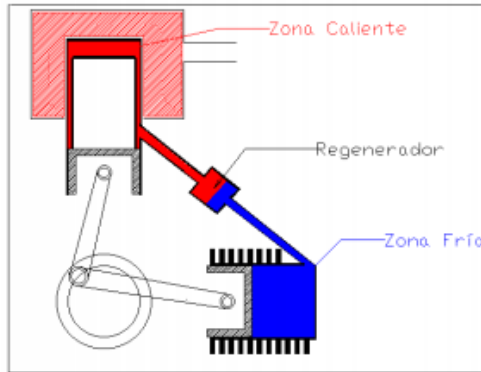


Figura 2. Esquema del motor Stirling tipo alfa

Fuente: (Miguel, 2016)

4.3.3.2 Configuración Beta

En este diseño se puede apreciar que los dos pistones se encuentran en la misma línea de acción, en el cual el pistón desplazador se ubica cerca de la fuente de alta temperatura y el de trabajo cerca del sumidero de baja temperatura. Existe una holgura entre el desplazador y el cilindro para permitir el paso del gas de la zona caliente a la fría y viceversa. Como los pistones se ubican en la misma línea de acción, solo se requiere de una cámara para contenerlos, haciéndolo más compacto(ver figura 3).

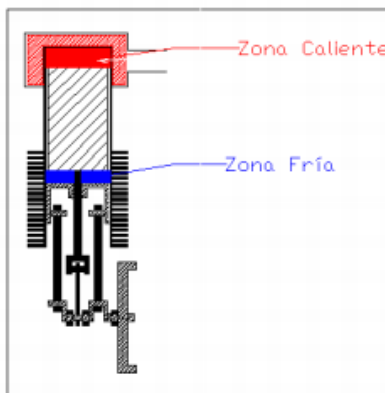
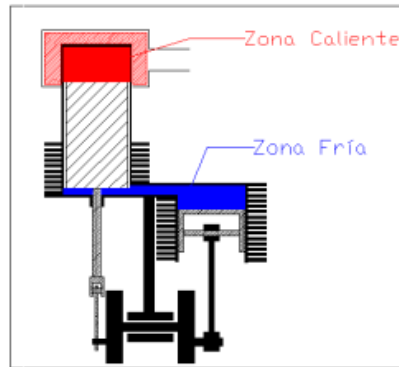


Figura 3. Esquema del motor Stirling tipo beta

Fuente: (Miguel, 2016)

4.3.3.3 Configuración Gamma

En el tipo Gamma, (ver figura 4) se incorporan ideas de los dos anteriores, consta de 2 cilindros separados, en uno de los cuales se sitúa el desplazador y en el otro el pistón de potencia. En este caso, en la cámara designada al pistón desplazador se ubica la fuente de alta temperatura en un extremo y el sumidero en otro Fuente: (Miguel, 2016).



*Figura 4. Esquema del motor Stirling tipo gamma.
Fuente: (Miguel, 2016)*

5 Estado Del Arte

Se han realizado muchos estudios para encontrar fuentes alternativas de energía y nuevos sistemas de conversión de energía. El motor Stirling es conocido como un motor de alta eficiencia térmica en comparación con otros tipos de motores, este motor es capaz de operar en un amplio rango de temperaturas y con diferentes combustibles como la solar, biomasa, el calor residual, etc.

En un artículo publicado por Kusch-Brand habla en el año 2019, sobre la energía proveniente de biomasa es una fuente de energía renovable. Casi la mitad de la energía renovable utilizada en 2017 fue proporcionada a nivel de su país por la bioenergía moderna, que representó aproximadamente el 12,4% del consumo total de energía final (Kusch-Brandt, 2019).

Así también De Gregorio en su artículo publicado en el 2019, su trabajo comenta que la energía de la biomasa desempeñará un papel fundamental para satisfacer la demanda

mundial de energía. La Agencia Internacional de Energía también ha pronosticado que en el período 2018-2023, la bioenergía será la fuente de energía renovable de más rápido crecimiento (con una tasa de crecimiento estimada del 30%)(De Gregorio, 2019).

En la publicación realizada por H. Ishaq en su investigación que fue publicada en el 2020 propuso un ciclo de cascada Brayton alimentado con biomasa. Los autores concluyeron que este tipo de sistema es una opción viable para la generación de energía con eficiencias de conversión de energía del 36% (Ishaq et al., 2020).

Bilgili en el año 2017 en su documento menciona una serie ventajas que tiene la producción de energía a partir de la biomasa sobre otras fuentes de energía, que pueden explicar el creciente interés por su consumo. Entre estas ventajas podemos mencionar las más relevantes, entre ellas tenemos que la energía de biomasa se puede utilizar para muchos propósitos diferentes, como cocinar, calentar, producir electricidad y transportar. En segundo lugar, la energía de biomasa es una fuente de energía renovable, abundante y de fácil producción. (Bilgili et al., 2017). En 2018 los señores Bildirici y Ozaksoylas menciona en su artículo otra ventaja sobre la producción de energía de biomasa contribuye a crear más oportunidades de empleo, lo que aumenta los ingresos y reduce la pobreza entre la fuerza laboral (Bildirici & Özaksoy, 2018).

Para este caso de estudio en el cual se está desarrollando el aprovechamiento de energético de la biomasa, Hejazi trata en su artículo que la biomasa se convierte en biocombustibles a través de dos vías principales, como son los procesos termoquímicos y bioquímicos este artículo fue publicado en el 2017. (Hejazi et al., 2017). Nagarajan en una publicación reciente del 2021, con su aporte en la publicación realizada habla sobre las fuentes de energía de biomasa que incluyen madera, pasto, paja, desechos sólidos urbanos, residuos agrícolas, desechos de cocina, desechos de aves de corral y desechos forestales, de todos estos tipos de biomasa podemos obtener un aprovechamiento energético (Nagarajan & Prakash, 2021).

Para entender acerca del rendimiento con lo referido en la publicación del 2017 del motor Stirling, Patel menciona que, en la actualidad, se desarrolla de manera teórica y experimentalmente investigaciones que intentan mejorar el rendimiento de los motores Stirling. En ese mismo documento menciona que la empresa Philips fabrica varios tamaños de motores Stirling de hasta 336 kW desde 1937, lo cual da referencia que desde hace

mucho tiempo se están desarrollando este tipo de tecnologías alternativas (Patel et al., 2017).

En general, para el desarrollo de la simulación del modelo termodinámico Cruz Rojas menciona en su documento que se pueden encontrar tres niveles de modelado de motores Stirling, entre los que se encuentran, el análisis ideal que estima las prestaciones teóricas ideales de un motor con un coeficiente de transferencia de calor por convección cero. También habla sobre el análisis desacoplado que toma los resultados del análisis ideal y los mejora, considerando un número específico de pérdidas y coeficientes finitos en el motor y por último el análisis acoplado se basa en una fina discretización del motor en diferentes volúmenes de control, considerando todas las principales pérdidas (Cruz-Rojas et al., 2015).

En su documento Kwasi-Effah, del año 2016, el análisis de primer orden fue desarrollado inicialmente por Schmidt, quien realizó un enfoque analítico de forma cerrada para predecir la potencia del motor. En ese documento se habla que la potencia y la eficiencia se sobrestiman en un margen del 30% o incluso más (Kwasi-Effah et al., 2016). En otro artículo relacionado con la eficiencia del motor Stirling, en el año 2017 el artículo de Ahmadi habla sobre unas temperaturas en las cuales pueden trabajar los motores Stirling y lograr un mejor rendimiento. Generalmente, los motores funcionan entre un calentador de 923 K y una temperatura más fría de 338 K. La eficiencia del motor está en un rango del 30% a 40%, y esta se podría lograr en un rango de temperatura de 923 K a 1073 K, con estimado de velocidad de 2000 a 4000 rpm (Ahmadi et al., 2017).

Abuelyamen en su documento haciendo más énfasis en la utilización del modelo termodinámico publicado en el 2017, demostró que el motor fue diseñado utilizando un modelo de primer orden y la potencia esperada era mucho menor que la potencia realmente obtenida. En esa investigación mostró que hay dos factores principales que limitan la producción de energía; en primer lugar, las pérdidas hidráulicas en el regenerador y, en segundo lugar, el gran volumen muerto. En consecuencia, modificó el prototipo eliminando algunos de los volúmenes muertos mediante la conversión de la configuración del motor Stirling de tipo γ a tipo α (Abuelyamen et al., 2017). Guven en el 2019, también en su investigación adoptó un modelo adiabático ideal para estimar el rendimiento de un motor Stirling de tipo β . Además, llevaron a cabo una investigación CFD para optimizar la geometría del calentador y el enfriador. Obteniendo resultados como la eficiencia térmica

ideal era del 40% con una potencia de salida de 1,5 a 2 kW (Güven et al., 2019). Siguiendo con los resultados de este tipo de modelo termodinámico, Mohammadi & Jafarian en los resultados de su investigación encontraron una buena concordancia entre los resultados experimentales y CFD en la región alejada del calentador. Mostró que la mayor parte de la caída de presión ocurre en el regenerador en ángulos de manivela de 90 ° y 270 ° donde el pistón y el flujo tenían la velocidad más alta. Con estas condiciones obtuvieron que sus resultados mostraron un error en el coeficiente de transferencia de calor que fluctuaba entre el 23% y el 75% (Mohammadi & Jafarian, 2018).

Siguiendo con el desarrollo de los temas sobre este trabajo, Alfianti llevo a cabo este trabajo mostrando que la eficiencia térmica del motor Stirling no solo depende de la temperatura (como Carnot), sino que también depende del volumen de desplazamiento del espacio muerto y del ángulo de fase (Alfianti, Z. 2016). Zayyinun & Widartono en su documento establecieron parámetros de un modelo térmico para analizar el motor Alpha Stirling. Los resultados comparados con mediciones experimentales presentaron una desviación del 21%. El sistema de ecuaciones diferenciales se aclara y luego se calcula mediante un método de iteración utilizando el programa Matlab (Zayyinun & Widartono, 2020).

Zare y Tavakolpour en su trabajo desarrollan una investigación acerca de los fluidos de trabajo esta publicación fue realizada recientemente en el año 2020, ellos hablan de la compresión y expansión de fluidos de trabajo como aire, hidrógeno y helio en dos cámaras es la base del motor Stirling y utilizan dos pistones con ángulo de fase para transferir el fluido de trabajo entre los espacios (Zare & Tavakolpour-Saleh, 2020).

Takeuchi en su investigación del año 2018, donde se menciona que la potencia de la tecnología del sistema de micro cogeneración que emplea energía renovable y este mostró en comparación con la generación de energía centralizada convencional, el suministro de energía descentralizada a pequeña escala, producida localmente y consumida localmente es superior en términos de eficiencia general (TAKEUCHI et al., 2018).

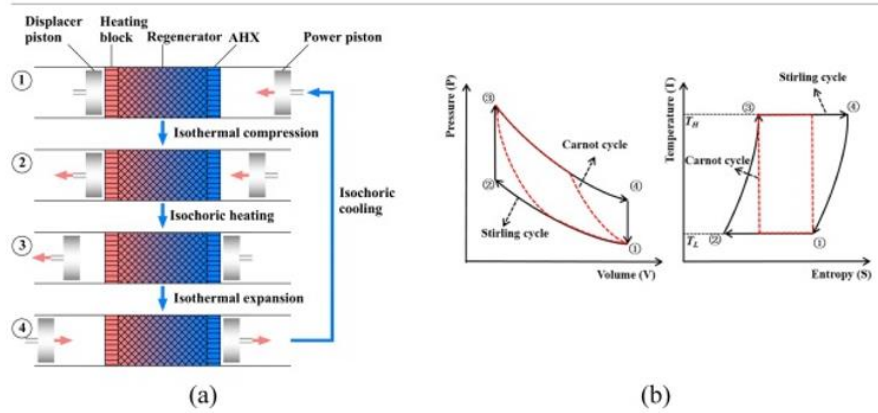


Figura 5. Principio de funcionamiento de un motor Stirling (b) Diagramas P - V y T - S para ciclos ideales de Stirling y Carnot.

Fuente (Zhu et al., 2021).

Zhu en la investigación desarrollada habla para el ciclo ideal Stirling, su eficiencia térmica es igual a la eficiencia de Carnot. (ver figura 5), La figura (a) muestra el principio de funcionamiento de un motor Stirling. La figura (b) muestra Diagramas P - V y T - S para los ciclos ideales de Stirling y Carnot. (Zhu et al., 2021).

Tavakolpour-Saleh propuso el método termodinámico de dimensión finita para modelar un motor Stirling cinemático de baja temperatura (Yousefzadeh & Tavakolpour-Saleh, 2021). Ding. ideó el ciclo combinado de combustión integrada de biomasa (BIFCC) y analizó el sistema desde los puntos de vista de la energía y la exergía (Ding et al., 2021).

Bégot en su documento propuso un modelo para calcular los parámetros termodinámicos del motor con la dinámica del desplazador y las oscilaciones del pistón utilizando un modelo adiabático, y demostró los principios para determinar el punto de ajuste del FPSE utilizando la gráfica del lugar de las raíces. (Bégot et al., 2013) Da Silva es su investigación desarrollada, quien realizó un estudio energético, exergético y económico de un sistema híbrido combinado de generación de refrigeración solar-biomasa-ORC. Los autores concluyeron que los parámetros económicos que más impactaron la Tasa Interna de Retorno (TIR) son el costo de la electricidad, el costo del colector solar y la biomasa (Morais et al., 2020).

Mouaky en su artículo presentó un estudio de caso de un sistema híbrido solar y de biomasa para una poli generación. Los resultados demostraron que el sistema proyectado podría mantener los requisitos de energía eléctrica (Mouaky & Rachek, 2020). Husaain su trabajo, los investigadores encontraron que un sistema híbrido de biomasa solar es una buena

opción de tecnología renovable con buena viabilidad económica en su implementación (Hussain et al., 2017). En el año 2020, Pantaleo en su publicación habla del análisis un sistema híbrido de biomasa solar. En este estudio, pudieron concluir que este tipo de configuración presenta una alta accesibilidad de calor de alta calidad para cogeneración, lo que mejora la rentabilidad del sistema en función de la demanda de calor (Pantaleo et al., 2020).

En el artículo Roy realizó un análisis económico y ambiental de una planta de energía basada en gasificación de biomasa que integra un módulo de celda de combustible de óxido sólido, Ellos informaron las eficiencias máximas de energía y exergía de 50 % y 44 % para su sistema propuesto (Roy et al., 2019).

Entezari en su publicación del 2018, presentó un análisis termodinámico y exergo económico de un ciclo combinado de ciclo de turbina de gas regenerativo y motor Stirling. Los resultados del costo nivelado de electricidad disminuyó en 10.3 % y eficiencia exergética mejorada por 16.1% en comparación con el punto óptimo del ciclo de turbina de gas independiente (Entezari et al., 2018). Y Rokni realizó en su documento que fue publicado en el 2017, un análisis termodinámico y económico en una pila de combustible acoplada a un motor Stirling, en los cuales analizó los parámetros de diseño del motor Stirling, como el regenerador de calor y los espacios muertos, que ayudaron a lograr una generación de energía y una eficiencia óptimas (Toro & Lior, 2017).

6 Metodología

Estado Del Arte.

- Hacer una compilación de las investigaciones que se realizaron recientemente sobre el tema.
- Realizar la matriz teórica con la información de cada uno de los documentos que se consultaron a cerca de las investigaciones.



Caracterización De La Biomasa.

- En este paso se hace la investigación de los documentos en los cuales ya se desarrollo la caracterización de la biomasa
- Escoger las condiciones y las propiedades con los valores necesarios para el desarrollo de la simulación.



La Simulación Del Modelo Termodinamico .

- Se hace la selección del programa de simulación "MATLAB & SIMULINK", así como la estructura y componentes para el desarrollo de un motor stirling tipo gamma.
- Se definen los dominios del motor y parámetros variables de entrada y de salida, se empieza a asignar valores para comenzar la simulación.
- Realizar el análisis de la combustión de la biomasa "fibra de coco", para conocer que tan aprovechable y eficiente es el proceso



Analizar la viabilidad ambiental y economica del sistema de generacion de energia.

- Con los resultados obtenidos en la simulación y el desarrollo mediante la investigación en la literatura, comparar para identificar si son un beneficio ambiental.
- La producción de energía de motor sea viable con la inversión económica



Análisis y conclusiones del trabajo

6.2 Caracterización de la biomasa

Para la caracterización de la biomasa se procedió a seleccionar resultados obtenidos del artículo “Evaluación de la energía y la exergía de un sistema híbrido de ciclo-orco de Brayton supercrítico combinado que utiliza radiación solar y biomasa de cáscara de coco como fuente de energía” donde realizan una caracterización de la biomasa en este caso fibra de coco y obtiene el potencial para la generación de energía. Esta caracterización se realizó de acuerdo con las guías de ASTM mencionadas en la tabla 1, para análisis elemental y próximo (Ochoa et al., 2021) .

Pauta ASTM utilizada para el análisis elemental y próximo.

Parámetro	Norma
Contenido de humedad	ASTM D-3173-17
Contenido de cenizas	ASTM D-3174-2
Materia volátil	ASTM D-3175-17
Azufre	ASTM D-4239-17
Valor calorífico	ASTM D-5865-13
Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Oxígeno	ASTM D-5373-16

Tabla 1. Pauta ASTM utilizada para el análisis elemental y próximo.

fuelle:(Ochoa et al., 2021)

6.3 Parametrización y Simulación del modelo termodinámico

La simulación está basada en un modelo desarrollado por MATLAB/SIMULINK en su base de datos, en el desarrollo de este modelo, el motor Stirling, se tiene presente las siguientes consideraciones, utiliza aire como fluido de trabajo, debido a que se encuentra en un sistema cerrado, no hay problemas con la contaminación. En esta parte del modelado y la simulación el cual tiene un rango de temperatura para su funcionamiento, obtenida por la combustión de la biomasa. Se desarrolla un modelo para el análisis termodinámico del motor en el cual se tiene transferencia de calor, el modelo toma en consideración el efecto de la temperatura de absorción en el análisis térmico, por lo tanto, el siguiente modelo

proporciona una guía para diseñar y operar el sistema del motor Stirling, así como la potencia de salida usando el software Matlab, esta simulación intenta demostrar la potencia generada del motor Stirling como una opción para la obtención de energía. Los parámetros que se tuvieron en cuenta para el diseño del modelo termodinámico realizado en SIMULINK® (ver figura 6), la cual nos ayudó a modelar nuestro sistema dinámico.

```
% Parametros de entrada
Temperatura_Foco_Caliente = 700; %[K]

Temperatura_foco_frio = 300; %[K]

presion_del_ambiente= 0.101325; %[MPa]

radio_del_piston_del_desplazador = 30e-3; %[m]

longitud_del_piston_del-desplazador = 180e-3; %[m]

radio_del_piston_de_potencia = 30.072e-3; %[m]

radio_de_la_manivela = 11.574e-3; %[m]

longitud_de_la_varilla_manivela_deslizante_ciguenal = 90e-3;90e-3; %[m]

radio_del_ciguenal = 19.8529e-3; %[m]
```

Figura 6. Parámetros establecidos para la simulación del modelo termodinámico.

Fuente: Autores

Se analiza un motor Stirling tipo gamma mediante implementación de biomasa, el cual modela y estudia el sistema de generación de energía, Como se puede ver en la Figura 8, el sistema está conformado por diferentes partes. El modelo consta de dos pistones conectados con una tubería de paso, el primer pistón se llama desplazador, figura 9, que es un cilindro de doble acción con dos cámaras, una es el calentador, que absorbe el calor de una llama, y el otro es el enfriador, que disipa el calor al ambiente, el volumen total del pistón del desplazador es constante, aunque el gas fluye desde el enfriador al calentador y viceversa a medida que se mueve la cabeza del pistón. El flujo entre ellos es a través del llamado regenerador. El regenerador, figura 9, es una tubería que permite el flujo entre el enfriador y el calentador en el pistón de desplazamiento, normalmente se implementa como una cabeza de pistón con un radio más pequeño que el cilindro, lo que permite fugas, el segundo pistón se llama pistón de potencia, figura 10, es un cilindro de acción simple con volumen variable conectado al desplazador a través de una tubería de paso, 11, este pistón produce el par y la potencia.

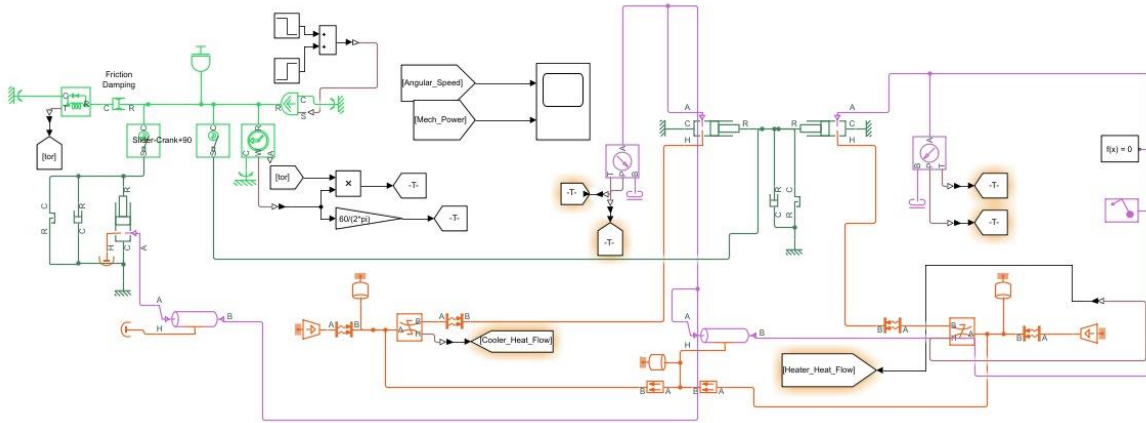


Figura 7. Modelo Termodinámico del motor Stirling en el software Matlab.
Fuente: software Simulink

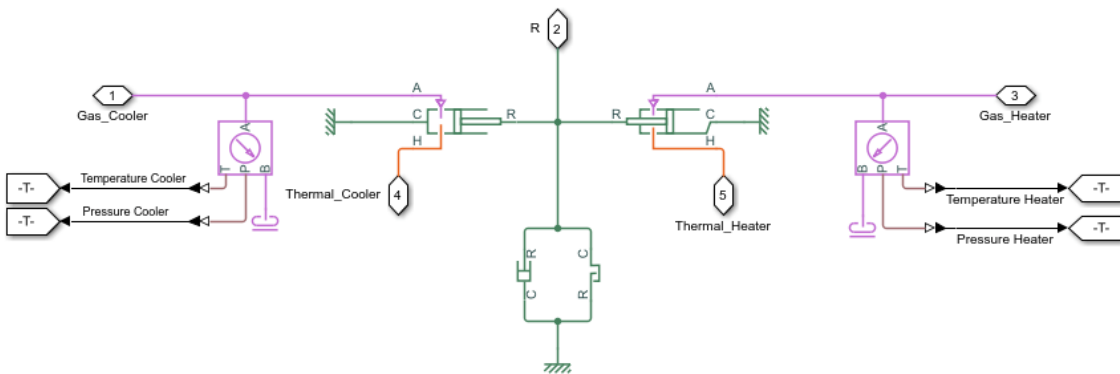


Figura 8. El pistón del desplazador.
Fuente: software Simulink

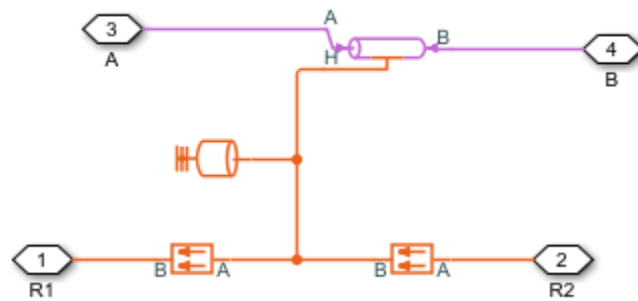


Figura 9. Regenerador.
Fuente: software Simulink

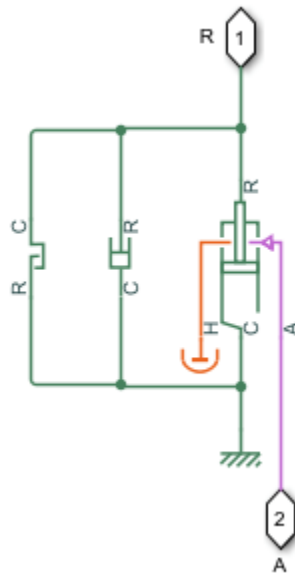


Figura 10. pistón de potencia.
Fuente: Software Simulink

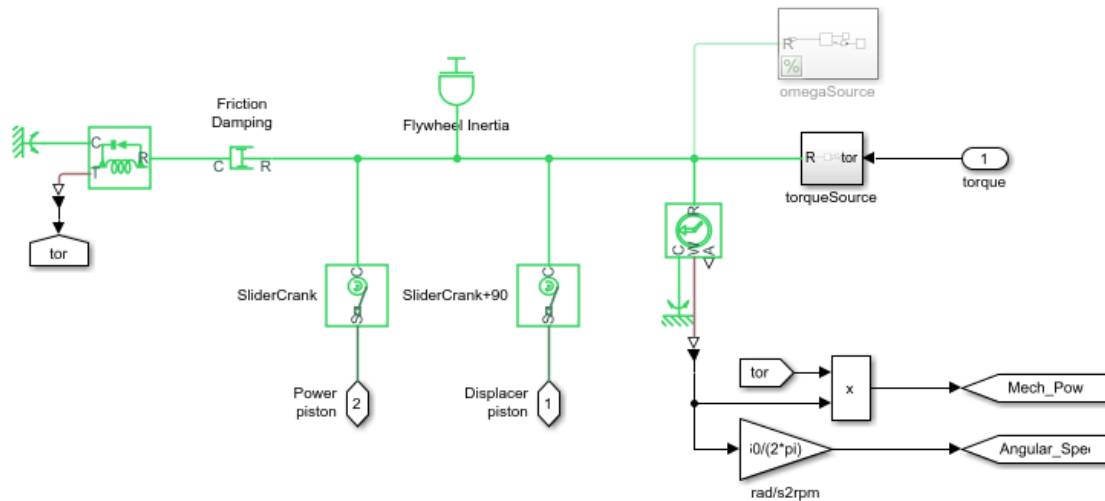


Figura 11. manivelas deslizantes y el volante.
Fuente: Software Simulink

6.4 Viabilidad Ambiental y Económica

El análisis económico que se utiliza para calcular el costo mínimo de la energía suministrada por un sistema o una tecnología, lo que representa un punto de equilibrio de ganancias. Este indicador comprende consideraciones económicas como la inversión inicial, los costos de instalación, los costos de mantenimiento y operación, las tarifas de

alimentación, las tasas de interés, la vida útil técnica y la depreciación. Los costos de fabricación y operación se pueden calcular y distribuir en anualidades durante la vida técnica del sistema térmico, considerando la depreciación anual. Para comparar las unidades de conversión de energía, los costos técnicos y de inversión se obtuvieron directamente de los fabricantes y proveedores comerciales, para el análisis de la viabilidad económica se tomaron los datos de las investigaciones realizadas en documentos anteriores donde se utiliza un motor Stirling accionado con una biomasa.

7 Resultados

7.1 Caracterización de la biomasa

Los resultados del análisis elemental y próximo realizado en la muestra cómo se describe en la metodología se presentan en la tabla 2.

Análisis aproximado% masa, base seca	Valor
Contenido de humedad	8.83
Contenido de cenizas	0.49
Materia volátil	92.16
Carbono fijo	7.35
Azufre	0.03
Valor calorífico (MJ / kg)	24.29
Análisis final% masa, base seca	
Carbón	47.7
Hidrógeno	5.44
Nitrógeno	0.06
Oxígeno	46.25

*Tabla 2. Composiciones químicas de la biomasa.
Fuente:(Ochoa et al., 2021).*

Los resultados revelaron que la biomasa (cáscara de coco) tiene un poder calorífico de 5,801 kcal/kg. Este resultado está relacionado con el contenido de cenizas que influye en el poder calorífico con un bajo contenido de materia inorgánica. Según Díaz en su publicación de año 2017, en general se puede considerar que el poder calorífico de la biomasa puede ser superior a 3000 kcal/kg para este tipo de residuos, presentando así esta biomasa un alto poder calorífico (Díaz et al., 2017).

7.2 Combustión

A continuación, en la figura 13 se muestra el código con el que se desarrollaron los cálculos de la combustión, haciendo una variación del exceso de aire.

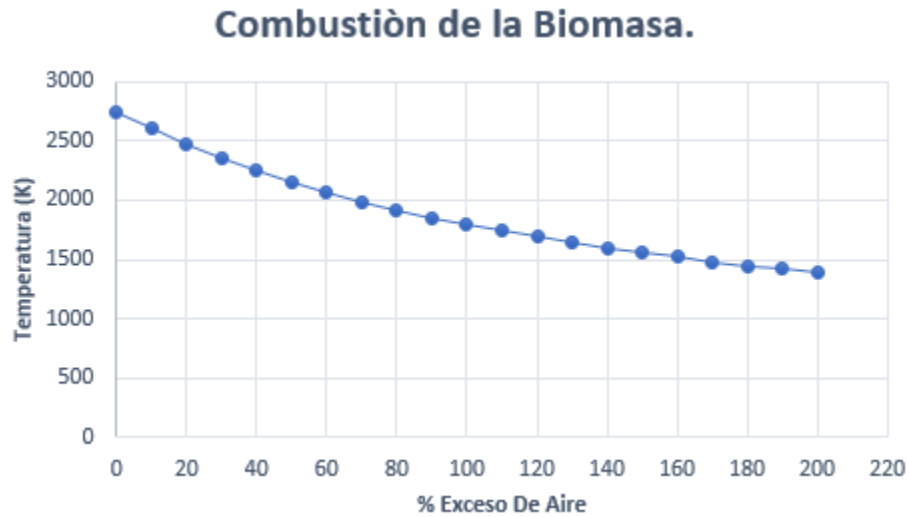
```
|Formula Empirica"
C=47.7 [%] "porcentaje de Carbono"
H=5.44 [%] "porcentaje de Hidrógeno"
N=0.06 [%] "porcentaje de Nitrógeno"
O=46.25 [%] "porcentaje de Oxígeno"
nC=(47.7/12) [mol] "Moles de Carbono"
nH=(5.44/1) [mol] "Moles de Hidrógeno"
nN=(0.06/14) [mol] "Moles de Nitrógeno"
nO=(46.25/16) [mol] "Moles de Oxígeno"
iC=nC/nC "Subíndice del Carbono para la formula empirica de la biomasa"
iH=nH/nC "Subíndice del Hidrógeno para la formula empirica de la biomasa"
iN=nN/nC "Subíndice del Nitrógeno para la formula empirica de la biomasa"
iO=nO/nC "Subíndice del Oxígeno para la formula empirica de la biomasa"
"C H_1,369 O_0,7272 N_0,0011+at( O_2 + 3,76 N_2)=aCO_2+bH_2 O+dN_2"
a=1 "Balance para el Carbono"
2*b=1.369 "Balance para el Hidrógeno"
0.7272+2*at=2*a+b "Balance para el Oxígeno"
0.0011+2*at*3.76=2*d "Balance para el Nitrógeno"

"C H_1,369 O_0,7272 N_0,0011+0,9787( O_2 + 3,76 N_2)=CO_2+0,6845H_2 O+3,68N_2"

h_forCO2=Enthalpy_formation(CO2) "entalpia de formacion del Dioxido de carbono"
h_forH2O=Enthalpy_formation(H2O) "entalpia de formacion del agua"
{-24290*(12+1,369+16*0,7272+0,0011*14)=h_forCO2+b*h_forH2O+h_forBIO} "entalpia de formacion de la biomasa"
h_forBIO=(-190.3-1407*(H/C))*2.326*25.0196
cpH2O=Cp(H2O,T=T1) "Cp del agua con Temperatura promedio"
cpCO2=Cp(CO2,T=T1) "Cp del CO2 con Temperatura promedio"
cpO2=Cp(O2,T=T1) "Cp del O2 con Temperatura promedio"
cpN2=Cp(N2,T=T1) "Cp del N2 con Temperatura promedio"

"TEMPERATURA DE LLAMA ADIABATICA"
h_forBIO=(h_forCO2+cpCO2*(T_a-298))+b*(h_forH2O+cpH2O*(T_a-298))+d*cpN2*(T_a-298)
T1=0.5*(T+298)
T=2750 "Temperatura final"
```

Figura 12. Código en EES para cálculo de la combustión con exceso de aire.
Fuente: autores.



*Figura 13. Relación de la temperatura de combustión VS % de aire.
Fuente: Autores*

El proceso de combustión de biomasa en este caso para la fibra de coco es un proceso complejo que consiste en numerosas reacciones, la combustión comienza con la ignición en la superficie de la biomasa y cuando una partícula de combustible entra en un horno, principalmente a través de la radiación térmica. Así, se propone un modelo que calcula la temperatura de los gases en relación con el exceso de aire. El estudio también reveló la necesidad de investigar la estabilidad de la combustión con respecto a la emisión de partículas en los gases de combustión, que pueden reducir la temperatura del motor Stirling. Con problemas relacionados con el contenido de cenizas de combustible, como incrustaciones y escorias, y una baja temperatura de los gases de combustión. Estos son problemas que, inevitablemente, conducen a una baja potencia y eficiencia específicas.

8.1 Simulación del modelo termodinámico.

A continuación, se muestra de la figura 15 hasta la 20 los resultados establecidos en la simulación:

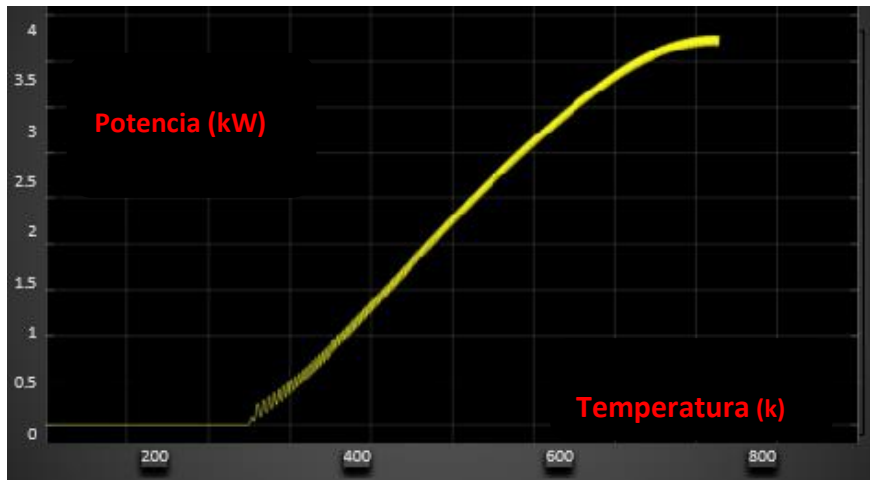


Figura 14. Resultado de la simulación para una temperatura 732 K, se obtuvo una potencia 3,97 kw

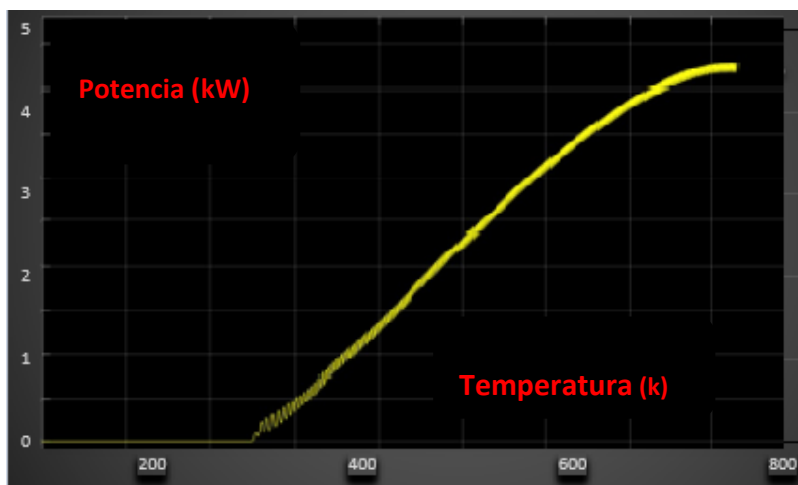


Figura 15. Resultado de la simulación para una temperatura 754 K, se obtuvo una potencia 4,29 kW

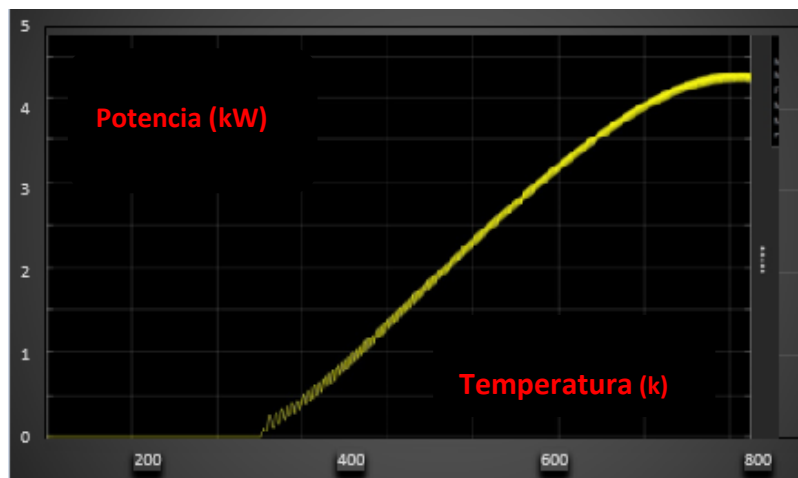


Figura 16. Resultado de la simulación para una temperatura 774 K, se obtuvo una potencia 4,42 kW

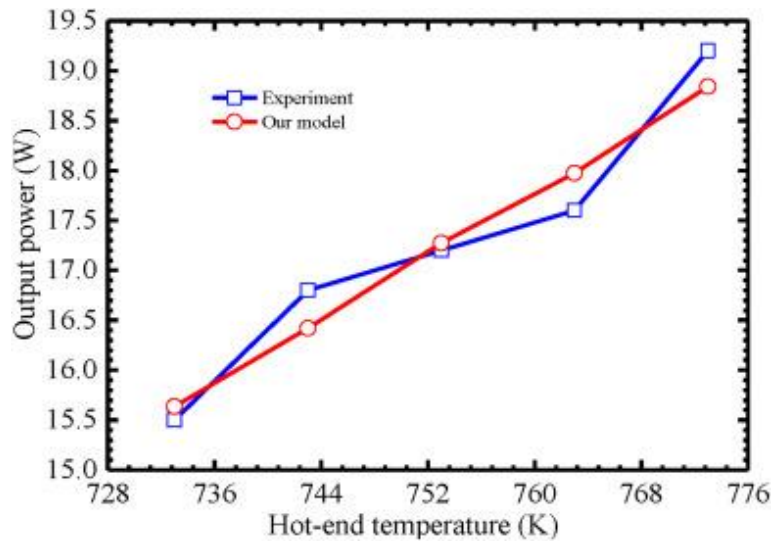


Figura 17. Temperatura de la fuente de calor frente a la potencia de salida.

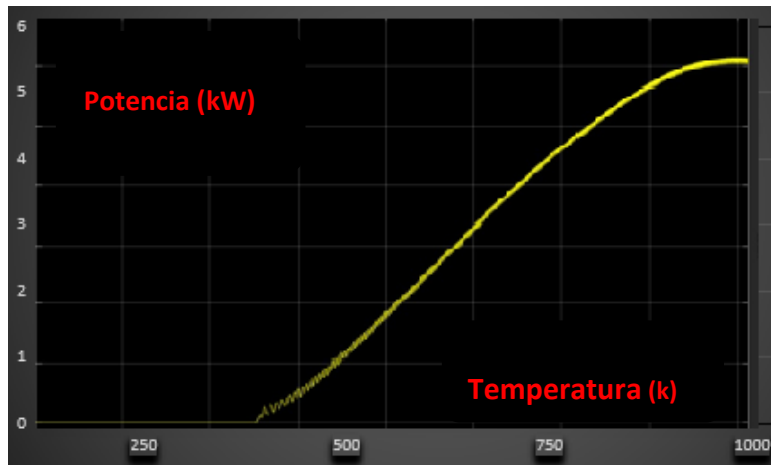


Figura 18. Resultado de la simulación para una temperatura 900 K, con sustancia de trabajo Aire. Potencia obtenida 5,397 kW

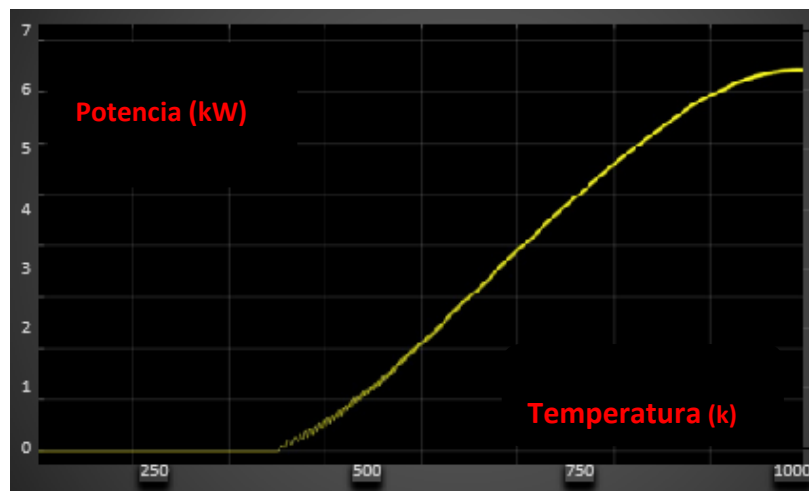


Figura 19. Resultado de la simulación para una temperatura 900 K, con sustancia de trabajo Helio. Potencia obtenida 6,138 kW

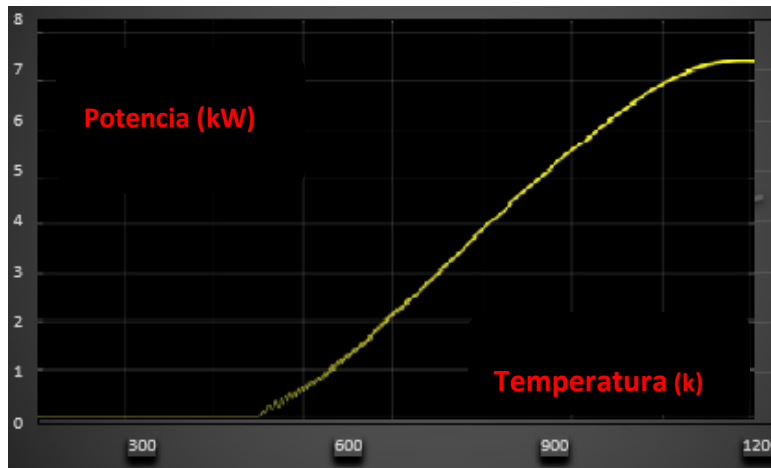


Figura 20. Resultado de la simulación para una temperatura 1200 K, con sustancia de trabajo Aire. Potencia obtenida 7,439 kW

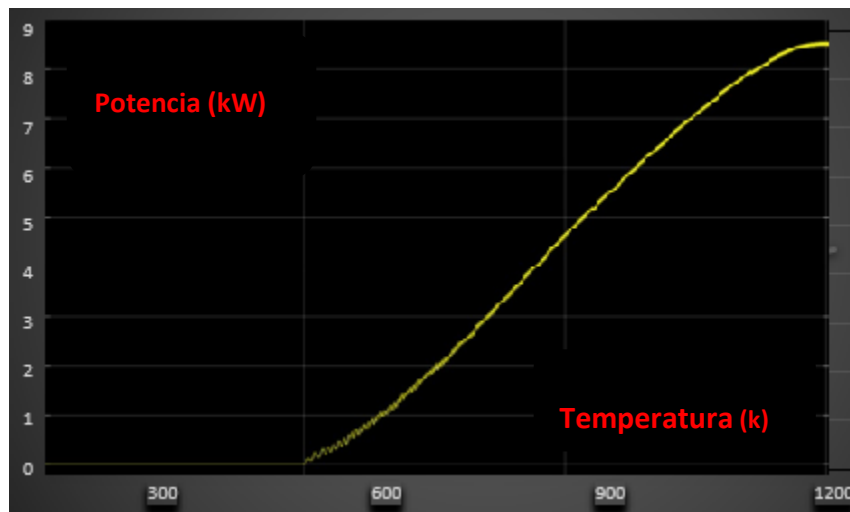


Figura 21 Resultado de la simulación para una temperatura 1200 K, con sustancia de trabajo Helio. Potencia obtenida 8,546 kW

En general por los resultados obtenidos los factores que más afectan la eficiencia del motor son las temperaturas de la fuente fría y caliente, las limitaciones de transferencia de calor en el proceso. Las pérdidas térmicas se deben por la energía necesaria para mover el fluido de trabajo a través de los intercambiadores de calor, Todos estos efectos se consideraron en el desarrollo de la simulación y se realizaron considerando aire como fluido de trabajo. los valores obtenidos de la potencia en la simulación son obtenidos por el calor transferido en la combustión de la biomasa como fuente de calor caliente con el receptor del motor Stirling. La temperatura es de alrededor de 700 K a 1200 K. Por lo tanto, cuando se utiliza un motor Stirling de biomasa, se obtiene un sistema con una potencia de salida de 4 kW y 8

kW. El motor Stirling alimentado con biomasa permite alcanzar valores relativamente altos para la eficiencia total del motor.

8.2 Eficiencia

En los resultados obtenidos presentó los resultados de las pruebas de una planta de cogeneración basada en SE alimentada con biomasa de 35 kW (Biedermann et al., 2004) que alcanzó una eficiencia eléctrica del 10 %

La figura 22, resume la eficiencia eléctrica nominal y la eficiencia térmica frente a la potencia eléctrica nominal para diferentes tecnologías de cogeneración. Como puede verse, la eficiencia eléctrica de las unidades tecnologías combinadas de calor y energía (CHP) basadas en un motor Stirling también depende en gran medida de la capacidad del motor y las unidades de mayor capacidad tienen mayores eficiencias eléctricas. También es interesante notar que para una potencia eléctrica dada, la eficiencia eléctrica de las tecnologías combinadas de calor y energía, es más alta que la de las tecnologías basadas en el ciclo de micro Rankine (MRC) y las tecnologías basadas en micro turbinas de gas (MGT) y está cerca de eso. de tecnología basada en los motores de combustión interna (ICE).

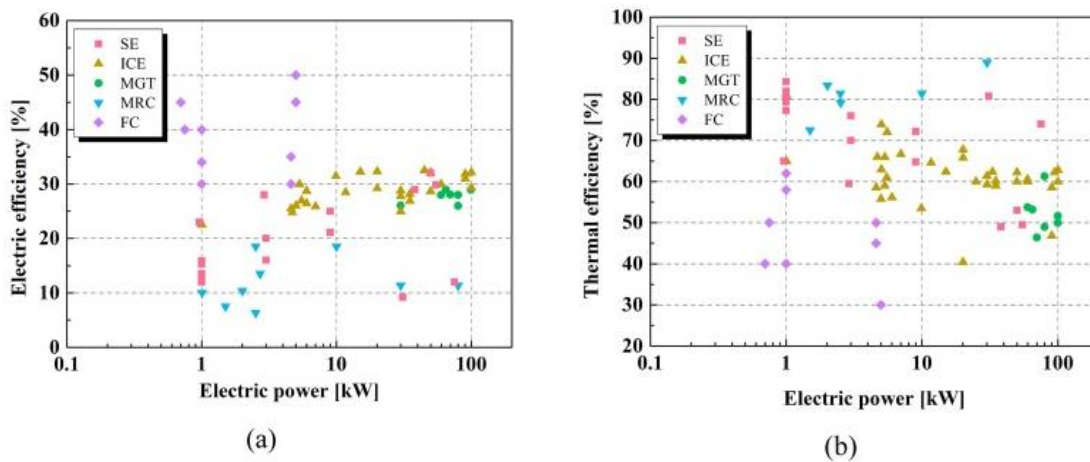


Figura 22. (a) Eficiencia eléctrica nominal y (b) eficiencia térmica frente a energía eléctrica

Fuente: (Zhu et al., 2021)

8.3 Viabilidad Ambiental y Costos Económicos

Los costos involucrados en la producción de energía incluyeron los costos de inversión con los costos de equipo, instalación, operación y mantenimiento. los costes se basaron en una caldera comercial de 20 kW. el costo total de mantenimiento se puede asumir como el 1% del costo total de inversión de las calderas de biomasa. El costo operativo proviene directamente del consumo de combustible. El costo del combustible proviene del consumo de la biomasa en este caso fibra de coco, que es un factor de la tasa de consumo y el precio del combustible. Según la literatura, estos sistemas funcionan durante un período de 7000 h por año. El tiempo de funcionamiento acumulado total de los motores Stirling es de unas 180 000 h, lo que corresponde a 20,5 años, considerando el avance de biomasa a la caldera de 12,98 kg / h, corresponde a 1063,4 € / kW por inversión (Ferreira et al., 2020).

Datos técnicos y económicos	Sistema de motor Stirling	
Datos técnicos	Capacidad del sistema [kW]	20
	Velocidad de alimentación de la biomasa (kg / h)	12,8
	Horas de trabajo a plena carga [h / año]	7000
	Vida técnica, [años]	20
Costos operativos y de inversión	Costos de capital de inversión [€]	26, 590
	<i>Alimentador de calderas y biomasa</i>	12,440
	<i>motor Stirling</i>	11,000
	<i>Componentes del sistema y almacenamiento de biomasa.</i>	3,150
	Costos de operación y mantenimiento [€ / año]	2,659
	Costos de combustible [€ / año]	14,336

Tabla 3. Datos técnicos y económicos del sistema para generación de energía.

Fuente:(Ferreira et al., 2020).

9. Conclusiones

En esta investigación, muestra la importancia de implementar este tipo de tecnología, que no sólo se convertiría en una opción económica para suplir la necesidad de falta de energía eléctrica, sino, también una opción que contribuye a la protección y mejora del medio ambiente.

se obtuvieron el análisis elemental y proximal de la fibra de coco, las propiedades de la cascara de coco como la humedad, material volátil, carbono, contenido de ceniza y el poder calorífico, determinados en la caracterización, se encuentran que están en lo rangos normales para este tipo de biomasa, convirtiéndola en una materia prima adecuada para el proceso de combustión de la biomasa. Es muy importante enfatizar que unos de los principales desafíos que enfrenta la generación de energía con biomasa como biocombustible, es la necesidad de suministrar biomasa de manera consistente y segura para la producción, esta implementación va a generar un costo razonable y es uno de los principales desafíos a los que se enfrentan. La utilización de la biomasa de la fibra de coco como recurso energético alternativo proporciona un medio económicamente viable de eliminación segura de los residuos generados. Por lo tanto, los resultados de la investigación consideran admisible la viabilidad ambiental y económica de las cáscaras de coco para su uso energético.

El motor Stirling alimentado con biomasa proporciona una potencia de salida de 4 kW promedio con una eficiencia total del 46,67%, las condiciones de contorno termodinámicas y las limitaciones que surgen del acoplamiento de la conversión termoquímica de biomasa y el ciclo de Stirling limitan la eficiencia eléctrica general de dicho sistema de cogeneración en realidad al máximo 15% - 20%. El uso de fuentes de energía renovables abarca el gran potencial del mundo. La biomasa es una buena opción porque evita los problemas habitualmente asociados a la intermitencia de los otros tipos de energía y el uso en instalaciones es significativo.

La eficiencia del motor Stirling es un factor clave al seleccionar la tecnología a implementar, dado que determina la cantidad reducida de energía primaria, las emisiones y el costo de funcionamiento, así como el período de recuperación. Estos sistemas donde se utiliza biomasa como biocombustible, tienen que tener presente el tipo de motor utilizado, el tamaño del motor, su modelo de funcionamiento y la temperatura de combustión, que se

encargan de mejorar el rendimiento de este tipo de máquinas. Cabe señalar que los beneficios económicos y ambientales potenciales de la generación no están exclusivamente relacionados con la tecnología, sino que dependen de cómo se diseñe la instalación completa o de cómo se opere e integre el sistema de generación dentro del sistema energético.

10 Referencias Bibliográficas

Abuelyamen, A., Ben-Mansour, R., Abualhamayel, H., & Mokheimer, E. M.

A. (2017). Parametric study on beta-type Stirling engine. *Energy Conversion and Management*.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.098>

Ahmadi, M. H., Ahmadi, M. A., & Pourfayaz, F. (2017). Thermal models for

analysis of performance of Stirling engine: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.033>

Angel, M., Cifuentes, A., Viviana, E., Rodríguez, M., & Hernández, M. C.

(2019). Prototipo de sistema termosolar para la generación de energía eléctrica a través del motor Stirling Thermosolar system prototype for electricity energy generation through the Stirling engine.

Revistas.Utp.Ac.Pa.

Anzures, C., Posada, J., Osorio, K., Medina, J. R. V., Sanchez, V. M., &

Lopez, Y. U. (2018). Operación de Sistemas de Generación y Suministro de Energía Eléctrica en Zonas no Interconectadas de Colombia. 2018

IEEE ANDESCON, ANDESCON 2018 - Conference Proceedings.

<https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2018.8564585>

Azeta, O., Ayeni, A. O., Agboola, O., & Elehinafe, F. B. (2021). A review on

the sustainable energy generation from the pyrolysis of coconut biomass.

In *Scientific African*. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00909>

Bégot, S., Layes, G., Lanzetta, F., & Nika, P. (2013). Stability analysis of free piston Stirling engines. *EPJ Applied Physics*.

<https://doi.org/10.1051/epjap/2013120217>

Berastegui Barranco, C., Ortega Rodríguez, J. P., Mendoza Fandiño, J. M., González Doria, Y. E., & Gómez Vasquez, R. D. (2017). Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tusa de maíz, bioaglomerante de yuca y carbón mineral del departamento de Córdoba.

Ingeniare, 25(4), 643–653. [https://doi.org/10.4067/S0718-](https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000400643)

[33052017000400643](https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000400643)

Biedermann, F., Carlsen, H., Schöch, M., & Obernberger, I. (2004). Operating experiences with a small-scale chp pilot plant based on a 35 kw el hermetic four cylinder stirling engine for biomass fuels. *BIOS*

BIOENERGIESYSTEME GmbH Company Website.

Bilgili, F., Koçak, E., Bulut, Ü., & Kuşkaya, S. (2017). Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development? In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.109>

Cabeza, D. R. (2016). Diseño de un sistema con motor Stirling para transformar energía libre en electricidad. *Tecno Campus Mataro*

Maresme.

Cardona, A. (2018). *Nariño es el departamento que lidera la siembra, cosecha y producción de coco en Colombia.* AGRONEGOCIOS.

Cruz-Rojas, A., Alvarado-Martínez, V. M., & López-López, M. G. (2015). Modelado, Simulación y Control de un Motor Stirling Tipo Alfa. In *Congreso Nacional de Control Automático.*

De Gregorio, M. (2019). Biomasa en España. Generación de valor añadido y análisis prospectivo. *Presupuesto y Gasto Publico.*

Díaz, L., Hernández, M., Silva, F., & Vasquez, R. (2017). Generación y caracterización del poder calorífico del biogás a partir de biomasa agrícola. *Centro de Investigacion Para El Desarrollo y La Innovacion,* 149–154. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/3211>

Ding, H., Li, J., & Heydarian, D. (2021). Energy, exergy, exergoeconomic, and environmental analysis of a new biomass-driven cogeneration system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments.*
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101044>

Entezari, A., Manizadeh, A., & Ahmadi, R. (2018). Energetical, exergetical and economical optimization analysis of combined power generation system of gas turbine and Stirling engine. *Energy Conversion and*

Management. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.012>

Epec. (2018). Energía renovable : la biomasa. *División de Gestión Ambiental*.

Ferreira, A. C., Silva, J., Teixeira, S., Teixeira, J. C., & Nebra, S. A. (2020).

Assessment of the Stirling engine performance comparing two renewable energy sources: Solar energy and biomass. *Renewable Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.020>

Güven, M., Bedir, H., & Anlaş, G. (2019). Optimization and application of

Stirling engine for waste heat recovery from a heavy-duty truck engine.

Energy Conversion and Management.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.096>

Hejazi, B., Grace, J. R., Bi, X., & Mahecha-Botero, A. (2017). Kinetic Model

of Steam Gasification of Biomass in a Bubbling Fluidized Bed Reactor.

Energy and Fuels. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b03161>

Herguedas, A., Taranco, C., Rodríguez, E., & Paniagua, prado. (2012).

Biomasa, Biocombustibles Y Sostenibilidad. In *Transbioma*.

Hoyos Álvarez, C. A., González Doria, Y. E., & Mendoza Fandiño, J. M.

(2019). Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de la mezcla de dos biomasa residuales, un aglomerante a base de yuca y carbón mineral, propios del departamento de Córdoba. *Ingeniare. Revista*

Chilena de Ingeniería, 27(3), 454–464. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052019000300454>

Hussain, C. M. I., Norton, B., & Duffy, A. (2017). Technological assessment of different solar-biomass systems for hybrid power generation in Europe. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.016>

Ishaq, H., Islam, S., Dincer, I., & Yilbas, B. S. (2020). Development and performance investigation of a biomass gasification based integrated system with thermoelectric generators. *Journal of Cleaner Production*.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120625>

Kusch-Brandt. (2019). Renewables 2019 Global Status Report. In *Resources*.

Kwasi-Effah, C. C., Obanor, A. I., Aisien, F. A., & Ogbeide, O. (2016). Review of Existing Models for Stirling Engine Performance Prediction and the Paradox Phenomenon of the Classical Schmidt Isothermal Model. *International Journal of Energy and Sustainable Development*.

Magacho, I. T., Borges E Silva, G., & Castro, G. G. P. (2019). Desenvolvimento de um motor stirling movido a energia solar. *Brazilian Journal of Development*. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n11-337>

MAPA. (2021). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion.

Identificación Oficial Ovino-Caprino.

Medina, J. R. V. (2019). Motor Stirling. In *Motor Stirling*.

<https://doi.org/10.2307/j.ctvckq8gh>

Miguel, V. (2016). Diseño de un motor Stirling. In *Diseño de un motor Stirling*.

Mohammadi, M. A., & Jafarian, A. (2018). CFD simulation to investigate hydrodynamics of oscillating flow in a beta-type Stirling engine. *Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.017>

Morais, P. H. da S., Lodi, A., Aoki, A. C., & Modesto, M. (2020). Energy, exergetic and economic analyses of a combined solar-biomass-ORC cooling cogeneration systems for a Brazilian small plant. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.147>

Mouaky, A., & Rachek, A. (2020). Energetic, exergetic and exergeoeconomic assessment of a hybrid solar/biomass cogeneration system: A case study of a rural community in a semi-arid climate. *Renewable Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.135>

Nagarajan, J., & Prakash, L. (2021). Preparation and characterization of biomass briquettes using sugarcane bagasse, corncob and rice husk. *Materials Today: Proceedings*, xxxx.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.457>

Núñez Camargo, D. W. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Revista Tecnura*.

<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.4.a10>

Ochoa, G. V., Forero, J. D., & Meri, L. (2021). *Energy and exergy assessment of a combined supercritical Brayton cycle-orc hybrid system using solar radiation and coconut shell biomass as energy source*. 175.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.118>

Pantaleo, A. M., Camporeale, S. M., Sorrentino, A., Miliozzi, A., Shah, N., & Markides, C. N. (2020). Hybrid solar-biomass combined Brayton/organic Rankine-cycle plants integrated with thermal storage: Techno-economic feasibility in selected Mediterranean areas. *Renewable Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.022>

Patel, V., Savsani, V., & Mudgal, A. (2017). Many-objective thermodynamic optimization of Stirling heat engine. *Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.151>

Planas, M., & Cárdenas, J. (2019). La matriz energética de Colombia se renueva. *Bid*.

Pupo-Roncallo, O., Campillo, J., Ingham, D., Hughes, K., & Pourkashanian,

M. (2020). Renewable energy production and demand dataset for the energy system of Colombia. *Data in Brief*.

<https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.105084>

Roy, D., Samanta, S., & Ghosh, S. (2019). Techno-economic and environmental analyses of a biomass based system employing solid oxide fuel cell, externally fired gas turbine and organic Rankine cycle. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.261>

TAKEUCHI, M., SUZUKI, S., & ABE, Y. (2018). Design method and the development of the low-temperature-difference indirect heating Stirling engine. *Transactions of the JSME (in Japanese)*.

<https://doi.org/10.1299/transjsme.17-00269>

Toro, C., & Lior, N. (2017). Analysis and comparison of solar-heat driven Stirling, Brayton and Rankine cycles for space power generation. *Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.104>

Urien, A. (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. In *Tesis De Máster*.

Yousefzadeh, H., & Tavakolpour-Saleh, A. R. (2021). A novel unified dynamic-thermodynamic method for estimating damping and predicting performance of kinematic Stirling engines. *Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120222>

Zare, S., & Tavakolpour-Saleh, A. R. (2020). Free piston Stirling engines: A review. In *International Journal of Energy Research*.

<https://doi.org/10.1002/er.4533>

Zayyinun, A., & Widyartono, M. (2020). Prototipe Mesin Stirling Menggunakan Panas Sinar Matahari Sebagai Energi Alternatif. *Teknik Elektro*.

Zhu, S., Yu, G., Liang, K., Dai, W., & Luo, E. (2021). A review of Stirling-engine-based combined heat and power technology. *Applied Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116965>