

Rumbo a los Sistemas Híbridos que utilizan el Motor Stirling

Germán Rodríguez-Sosa, Mario F. Suzuki-Valenzuela, Pablo Alberto Limón-Leyva, Ian Sosa-Tinoco

Instituto Tecnológico de Sonora, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica,

Antonio Caso S/N Col. Villa ITSON, Ciudad Obregón, Sonora, México

german.rodriguez70279@potros.itson.edu.mx

mario.suzuki@itson.edu.mx

pablo.limon@itson.edu.mx

ian.sosa@itson.edu.mx

Resumen

Este capítulo aborda la evolución, diseño y aplicaciones de los motores Stirling, en sus diferentes variantes como los son el alfa, beta y gama, enfatizando su importancia en la sostenibilidad y eficiencia energética. Las investigaciones revisadas destacan la optimización del rendimiento termodinámico y la integración de materiales avanzados para mejorar la eficiencia y durabilidad. Se analizan aplicaciones en generación de energía, refrigeración y cogeneración de calor y electricidad (micro-CHP), resaltando su capacidad para reducir emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia energética. Los sistemas híbridos que combinan motores Stirling con otras tecnologías, como paneles solares o sistemas de biomasa, se presentan como soluciones efectivas para maximizar la eficiencia energética y la versatilidad operativa.

Estos sistemas híbridos aprovechan las ventajas de múltiples fuentes de energía, ofreciendo una mayor estabilidad y fiabilidad en la generación de energía. Los estudios muestran que los motores Stirling pueden alcanzar altos niveles de eficiencia térmica y fiabilidad operativa, no obstante, se identifican desafíos, como la optimización de parámetros de diseño, selección de materiales adecuados y reducción de costos de inversión y fabricación. A pesar de estos retos, las oportunidades para mejorar la viabilidad comercial y eficiencia de estos sistemas son significativas, algunos estudios indican que, bajo condiciones de alta eficiencia, estos sistemas son preferibles a las tecnologías convencionales, sin embargo, con eficiencias más realistas, no siempre son competitivos en términos ambientales ni económicos. Los motores Stirling y los sistemas híbridos que los utilizan representan una tecnología prometedora para un futuro energético más sostenible y eficiente.

Palabras clave: Motor Stirling, Sistema dish Stirling, Sistemas híbridos, Energía solar, Biogás.

Abstract

This chapter addresses the evolution, design, and applications of Stirling engines, in their different variants such as alpha, beta and gamma, emphasizing their importance in sustainability and energy efficiency. Research reviewed highlights the optimization of thermodynamic performance and the integration of advanced materials to improve efficiency and durability. Applications in power generation, refrigeration and combined heat and power (micro-CHP) are analyzed, highlighting their ability to reduce greenhouse gas emissions and improve energy efficiency. Hybrid systems that combine Stirling engines with other technologies, such as solar panels or biomass systems, are presented as effective solutions to maximize energy efficiency and operational versatility. These hybrid systems take advantage of multiple energy sources, offering greater stability and reliability in power generation. Studies show that Stirling engines can achieve high levels of thermal efficiency and operational reliability. However, challenges are identified, such as optimization of design parameters, selection of suitable materials and reduction of investment costs. Despite these challenges, the opportunities for improving the commercial viability and efficiency of these systems are significant. Some studies indicate that, under high efficiency conditions, these systems are preferable to

conventional technologies. However, at more realistic efficiencies, they are not always environmentally or economically competitive. Stirling engines and the hybrid systems that use them represent promising technology for a more sustainable and efficient energy future.

Key words: Stirling engine, Stirling dish system, Hybrid systems, Solar energy, Biogas.

Introducción

Revisiones previas al 2021 del motor Stirling

Investigaciones previas relacionadas al motor Stirling hasta el año 2021 se han centrado en la optimización de rendimiento, eficiencia, sostenibilidad, integración de tecnologías, modelado y control avanzado, siendo áreas de interés para lograr un mejor funcionamiento individual del motor, así como de encontrar sinergias con otras tecnologías.

Los estudios han abordado la optimización del rendimiento termodinámico de los motores Stirling, considerando variables como el volumen muerto, la efectividad del regenerador y la frecuencia de operación (Getie *et al.*, 2020; Schneider *et al.*, 2020; Zare *et al.*, 2021), aunado a materiales avanzados y tecnologías innovadoras para mejorar la resistencia, eficiencia y rendimiento (Singhet *et al.*, 2018; Zare *et al.*, 2021), así mismo, la optimización de parámetros como la frecuencia de operación y las carreras de los pistones puede mejorar la potencia y eficiencia de los motores Stirling (Zare *et al.*, 2021), la exploración de ciclos de trabajo alternativos y la optimización detallada de la geometría del motor son áreas prometedoras para mejorar el rendimiento (Getie *et al.*, 2020; Zare *et al.*, 2021). Aunado a lo anterior, otros estudios han destacado el potencial de los motores Stirling como una alternativa sostenible en comparación con sistemas convencionales, especialmente en términos de eficiencia energética y reducción de emisiones (Hachem *et al.*, 2018; Zare *et al.*, 2021), con lo que otras investigaciones han resaltado la importancia de seguir avanzando en el desarrollo de tecnologías CHP basadas en motores Stirling para aumentar la eficiencia y viabilidad comercial

(Zare *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2021). Por otra parte investigaciones han desarrollado modelos termodinámicos avanzados, sumando al diseño y centrados en analizar el rendimiento explorado estrategias de control avanzadas para mejorar la eficiencia y respuesta dinámica (Ahmed *et al.*, 2020; Zare *et al.*, 2021). Se ha demostrado que el uso de técnicas híbridas, puede emplearse para modelar adecuadamente los motores Stirling (Zare *et al.*, 2021), lo anterior asociado al funcionamiento y mejora es ampliamente abordado. En lo relacionado a aplicaciones híbridas o aplicaciones específicas se han explorado desde la generación de energía, la refrigeración, o sistemas de energía utilizando biomasa como combustible (Ahmed *et al.*, 2020; Schneider *et al.*, 2020; Zare *et al.*, 2021). En esta misma línea los estudios han identificado desafíos específicos, como la formación de escorias en intercambiadores de calor debido a las cenizas.

En lo relacionado a las brechas del conocimiento, existen varios tópicos, como la optimización de parámetros, la geometría para mejorar la eficiencia (Zare *et al.*, 2021), la frecuencia de operación, las carreras de los pistones, la potencia máxima y eficiencia de los motores (Schneider *et al.*, 2020; Zare *et al.*, 2021), la integración de materiales avanzados para mejorar la resistencia y eficiencia (Singh *et al.*, 2018), la formación de escorias en intercambiadores de calor en sistemas de biomasa para mejorar la eficiencia y durabilidad de los sistemas (Zare *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2021), la integración de técnicas de computación para desarrollar modelos predictivos más precisos y eficientes y finalmente lo relacionado a la reducción de costos de inversión para aumentar la viabilidad comercial de los sistemas Stirling (Zare *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2021).

Motor Stirling: Tecnología y Principios de Funcionamiento

El motor Stirling fue inventado por Roberto Stirling en 1816. Este motor puede trabajar con muchas fuentes de energía y suministrar la parte externa del receptor del motor, sin embargo, el rápido desarrollo de los motores de combustión interna ocasionó una falta de interés. Sin embargo, los problemas de calentamiento global y la explotación de combustibles fósiles han hecho que se retomen el interés por estos motores en recientes años. Algunas de sus características son el poder trabajar continuamente con bajo ruido y mantenimiento fácil y económico con fuentes de calor como la Solar, geotérmica e incluso con calor de desperdicio (Arslan *et al.*, 2023).

Principios básicos

Los motores Stirling tienen la particularidad de funcionar con un suministro de calor externo, de tal manera, que los hace flexibles a cualquier fuente de calor, con una buena eficiencia. El ciclo Stirling consiste en comprimir y expandir un gas de trabajo que puede ser helio, hidrógeno,

nitrógeno o aire (Rodríguez-Sosa, 2019). En la compresión isotérmica A-B (Figura 1, de 0-90 grados en el eje) el gas de trabajo se comprime mientras la temperatura se mantiene constante mediante el sistema frío. Al fluido comprimido de baja temperatura se transfiere calor del regenerador a volumen constante, proceso isocórico de B-C (Figura 1, de 90 a 180 grados en el eje) y la expansión isotérmica sucede de C-D (Figura 1).

Los motores Stirling se clasifican por su configuración y modo de operación. Las configuraciones más comunes son alfa, beta y gamma (Figura 2). El motor alfa tiene dos pistones conectados en serie (un lado frío y otro caliente). En el motor tipo beta, el pistón y desplazador se ubican en un solo cilindro, mientras que el tipo gamma tiene los pistones de potencia y de desplazamiento, en cilindros separados. También se pueden clasificar por su simple o doble acción basado en el número de pistones y su arreglo mecánico (rómico, de yugo, biela-manivela, plato tambaleante) y de pistón libre (FPSE), incluso por el fluido de trabajo (Ahmed *et al.*, 2020).

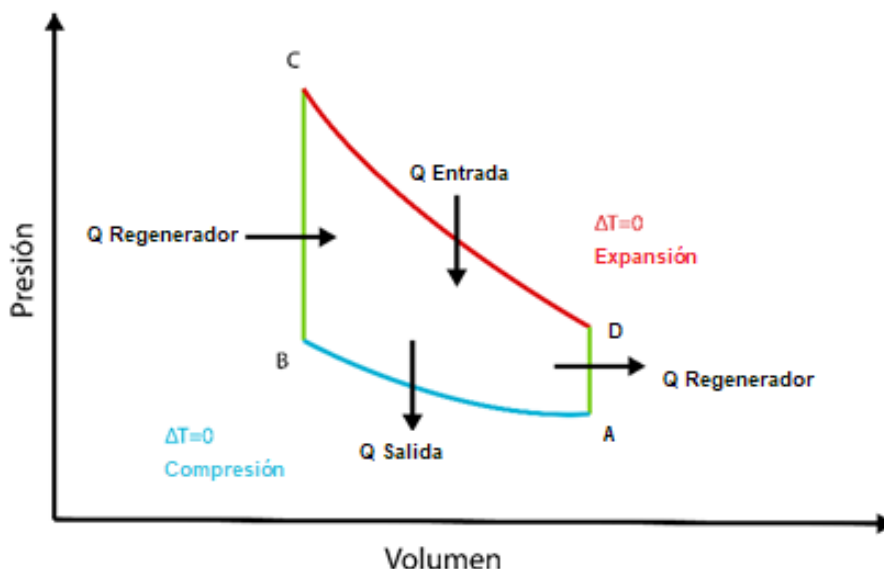


Figura 1. Diagrama P-V de ciclo Stirling.

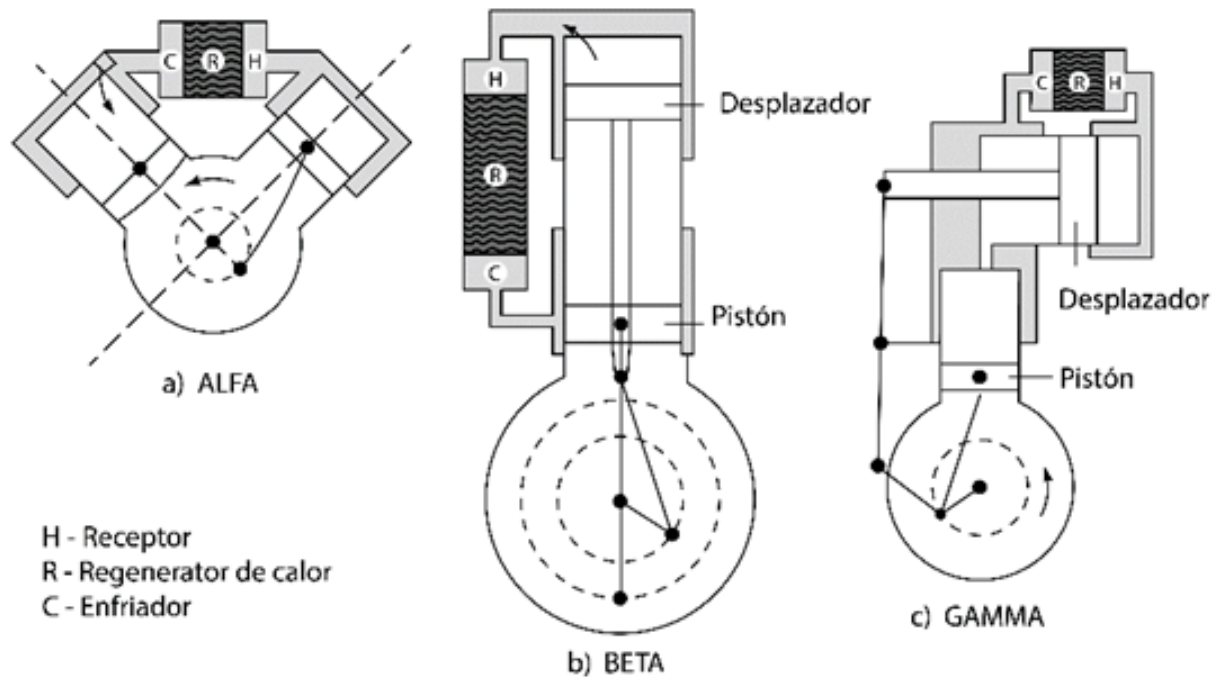


Figura 2. Clasificación de motores Stirling (Elaboración propia).

Diseño, análisis y construcción de un motor Stirling

La gran variedad de configuraciones lo hace complejo como objeto de estudio; por ejemplo, la operación es derivada de parámetros geométricos (el volumen de barrido, volúmenes muertos, área de intercambio de calor, la relación de compresión) para algunas condiciones de trabajo (velocidad, presión principal, diferencial de temperatura y fluido de trabajo).

El regenerador tiene un gran impacto en la operación y su material, porosidad y diseño debe de ser optimizado, de igual manera, la selección del diseño del calentador y del enfriador depende de la aplicación del motor Stirling. El intercambiador de calor tubular usualmente es para micro-CHP y el de forma acanalada es atractivo para aplicaciones de baja temperatura. Cada configuración tiene un calor óptimo de rotación que debe de ser respetado debido a su doble efecto. Por un lado favorece el intercambio de calor por convección y por otro lado, se obtienen pérdidas por la fricción que

causa la viscosidad del fluido. Incrementar la temperatura de entrada incrementa la energía, además, que se aumenta la potencia al freno en el eje. Sin embargo, la temperatura debe de ser moderada debido a la resistencia del material de los intercambiadores de calor, por lo que la lubricación debe de ser mínima o totalmente trabajar en seco. De igual manera, la fuga del gas de trabajo cuando este opera bajo altas presiones puede presentarse en estas condiciones (Hachem *et al.*, 2018).

En la literatura existen distintos autores que explican parcialmente el diseño, análisis y construcción de motores Stirling de los tres tipos principales. Se listan algunos resultados encontrados en la literatura a continuación.

Cinar y colaboradores (2005), diseñaron y fabricaron un motor Stirling tipo gamma con un diferencial de baja temperatura. Se realizaron pruebas utilizando gas LP como fuente de calor y agua como fluido enfriador. En un estudio de Shendage y colaboradores (2011) se presenta una metodología de diseño para un

motor Stirling tipo beta con un mecanismo de accionamiento romboidal. Se discuten aspectos como la selección de configuración, análisis del mecanismo, cálculo del volumen superpuesto y optimización del ángulo de fase. Otro estudio interesante es el de Çinar y colaboradores, (2012), quienes describen el desarrollo y rediseño de un motor Stirling tipo alfa con dos cilindros. Uno más analiza diseña y construye un motor Stirling tipo alfa de bajo costo con materiales como acrílico, realizado con el propósito de instruir sobre principios de termodinámica y conversión de energía (Hosotani *et al.*, 2014). Por otro lado Chen y colaboradores (2017), realizan un estudio exhaustivo sobre los efectos de los parámetros geométricos en un motor Stirling tipo gamma con simulaciones computacionales.

Aunado a lo anterior Rodríguez-Sosa, (2019), diseñó y manufacturó un motor Stirling tipo alfa de 32.21 cm³ de volumen neto, y aire como fluido de trabajo, con un mecanismo biela-manivela. El prototipo fue expuesto a temperaturas hasta de 250 °C en el receptor de calor, operó a 1,280 RPM con bajo ruido, sin sufrir desgaste y sin deformación, debido a la alta termofluencia de sus materiales. Concluye que, para optimizar el motor, se deben seleccionar los materiales adecuados para cada componente, se debe mantener precisión en las dimensiones de la manufactura, el aceite debe de ser muy ligero y soportar altas temperaturas.

Ahmed y colaboradores (2020) hicieron una revisión integral de modelos térmicos de los motores Stirling; corroboraron los resultados por medio de un prototipo de experimentación llamado GPU-3. Con el fin de mejorar los motores, se analizaron varios modelos y estudios de optimización, y de igual manera, se investigaron técnicas basadas en la optimización efectiva y eficiente de parámetros operativos y geométricos del motor Stirling. De La Bat y colaboradores (2020) presentaron la simulación numérica, la manufactura y la validación experimental de un motor Stirling con un mecanismo libre para

generación de energía eléctrica. Se explicó el modelo numérico llamado SENSE (simulación numérica del motor Stirling), además de las características del motor de 100 W. Explicaron el modelo empleado, el cual considera la mecánica y la termodinámica del motor concluyendo que el modelo es capaz de emular la operación de un motor Stirling de pistón libre (FPSE), debido a las variaciones que existen entre los resultados experimentales y los simulados en el modelo.

En la investigación por parte de Cheng y colaboradores (2021) se desarrollaron un modelo numérico combinando aspectos termodinámicos y dinámicos para analizar la operación de un motor Stirling de pequeña escala de doble acción de cuatro cilindros modelo alfa. El modelo lo validaron usando datos experimentales obtenidos de pruebas de un prototipo. El motor alcanza una potencia en el eje de 26W con 754 RPM, bajo un torque de 0.33 Nm, mientras que de la simulación se obtiene una potencia en el eje de 24.5W y una velocidad de 780 RPM. Los resultados indican que se puede usar para estudiar la operación de motores de baja escala expuestos a diferentes condiciones de operación. Luo y colaboradores (2024) realizaron un estudio de un modelo dinámico lineal combinado para predecir la operación de salida y optimizar los parámetros de un FPSE (Motor Stirling de Pistón Libre) de tipo gamma de 60W.

En los artículos revisados sobre motores Stirling, se observó un enfoque detallado en aspectos como el diseño, análisis y construcción de estos dispositivos, sin embargo, hay ciertos aspectos que no se mencionan explícitamente y que podrían ser igualmente importantes, tales como la selección de materiales, la gestión de tolerancias durante la fabricación de los componentes y la optimización del diseño del regenerador para mejorar la eficiencia del motor. Finalmente, aspectos cruciales como la durabilidad de los materiales y el análisis de vida útil no son discutidos en profundidad.

Eficiencia y fiabilidad

A diferencia de los motores de combustión interna, el motor Stirling es altamente eficiente y puede funcionar con una variedad de fuentes de calor, lo que lo hace más confiable y versátil en diversas aplicaciones. La alta eficiencia del motor Stirling permite una conversión más efectiva de calor en trabajo mecánico, lo que resulta en un mayor rendimiento global del sistema. Normalmente, la eficiencia de los motores Stirling es expresada por el área de eficiencia térmica, la cual es calculada con base en el principio de Carnot, usando las temperaturas extremas del ciclo. En el mismo, se consideran las pérdidas térmicas y las pérdidas de fricción del motor ya que impactan en la eficiencia final y en la operación (Hachem *et al.*, 2018).

La eficiencia de los motores Stirling es atribuida a su tipo de ciclo cerrado de operación, donde el fluido de trabajo va desde la compresión hasta el proceso de expansión. Comparados con otros motores de calor, los Stirling pueden alcanzar una eficiencia térmica muy alta dependiendo de su operación en bajos diferenciales de temperatura, reduciendo pérdidas térmicas. Cabe mencionar que la eficiencia puede ser optimizada a través de los parámetros de diseño y los ajustes en la operación (Luo *et al.*, 2024). Por ejemplo, algunos estudios han demostrado que los motores Stirling pueden alcanzar un rango de eficiencia de 38 a 40% dependiendo de la configuración (Ahmed *et al.*, 2020; Cheng *et al.*, 2021).

Aplicaciones de los Sistemas con Motor Stirling

Sistema Dish Stirling (SDS)

Los sistemas de disco parabólico o Dish Stirling, deben su nombre a que están diseñados con espejos parabólicos de revolución y un motor de combustión externa Stirling, los cuales se ubican en la zona focal de concentrador para transformar la radiación solar en electricidad.

Diversos autores han realizado estudios para evaluar criterios de diseño y eficiencia. En el año 2020, Zayed y colaboradores (2020), realizaron un estudio para predecir algunos parámetros de operación y un análisis económico de un sistema de generación de electricidad con tecnología SDS, con un rango de potencia de 25 kW. En el estudio se desarrolló un modelo matemático implementado en MATLAB para simular las condiciones de operación en la ciudad de Tianjin, China. Aunado a lo anterior realizaron un estudio para evaluar la viabilidad, en relación con el costo de la electricidad y el ciclo de vida del SDS, por lo que da entrada a poder comparar y evaluar con otras aplicaciones. Los autores concluyen que el SDS, aun no es apropiado debido a los costos de producción y recomienda ubicarlos en sistemas con alta radiación solar.

En ese mismo año, Zayed y colaboradores (2020), desarrollaron un estudio para un diseño óptimo de parámetros en la operación de un SDS balanceado termodinámicamente usando un modelo con múltiples objetivos con un enjambre de partículas (MOPSO), considerando opto-geometría y un balance de energía de los diferentes componentes del sistema. Los resultados mostraron un aprovechamiento máximo de 23.46 kW de potencia de salida con una eficiencia de 30.15% demostrando que un concentrador de radio de 2.5-15 m puede producir una potencia de salida de 1.43-53.34 kW con eficiencias de 29.80-30.20 %.

Por su parte, Buscemi y colaboradores (2020), mediante un análisis teórico, desarrollaron un modelo numérico del sistema basado en un balance de energía del colector y una expresión simplificada de la eficiencia de carga parcial del motor Stirling. El modelo muestra un excelente ajuste a los datos experimentales y puede predecir la salida de potencia eléctrica. El análisis realizado en el estudio muestra una fuerte correlación lineal entre potencia eléctrica neta y radiación cuando los espejos están limpios ya que se estima una reducción del 30% en eficiencia óptica debido a la suciedad de los espejos.

El año siguiente, Zayed y colaboradores (2021), realizaron un análisis paramétrico integral, diseño y evaluación de la operación de un SDS. El estudio modela matemáticamente en MATLAB un SDS y hace, tanto un análisis de la óptica, como de la termodinámica, analizando parámetros como el diámetro del concentrador, la temperatura del receptor, la dirección de la radiación solar, la velocidad del aire y la temperatura ambiente, para determinar el efecto de la salida de potencia y de la eficiencia de SDSS. Concluyen que las investigaciones deberían de enfocarse en la óptica y los componentes de la parte térmica, paralelamente con la industrialización de los procesos del concentrador y receptor, el cual se considera un reto esencial para un mejor desarrollo de los sistemas SDSS.

También Buscemi y colaboradores (2021) desarrollaron una metodología de optimización para un SDS basado en la distribución de la frecuencia local de la dirección de la radiación normal, enfocándose en una estrategia que ayuda a ampliar la difusión del SDS para optimizar la medida del receptor según la hora del día ya que este influye en el haz de radiación y repercute en el suministro de energía y en los costos de la energía producida. Los resultados muestran una eficiencia de 24%.

Shaikh y colaboradores (2021) desarrollaron un estudio de SDS para evaluar un modelo que simula condiciones ambientales en la ciudad de Jamshoro, Pakistán, con el propósito de predecir la operación del sistema SDS. Como parte del análisis, los autores consideraron las emisiones de CO₂, además de los parámetros de opto-geometría, con el fin de obtener más salida de potencia en el sistema. También demostraron que, según la sensibilidad del análisis, el área del espejo y el colector afectan al costo de la producción de la corriente eléctrica, por lo que recomiendan buscar la hibridación de estos sistemas para hacerlos más rentables y eficientes.

Sistema CHP Stirling

Los sistemas de micro-cogeneración de calor y electricidad (micro-CHP) con motores Stirling presentan una alternativa prometedora para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos sistemas permiten la generación simultánea de electricidad y calor, lo que puede aumentar la eficiencia total del sistema en comparación con las tecnologías convencionales de generación de energía y calefacción.

Algunos estudios relevantes encontrados en la literatura como el de Kaldehi y colaboradores (2017), tratan sobre el diseño de un motor alfa para aplicaciones residenciales, optimizando el rendimiento y la eficiencia del sistema mediante modelos matemáticos y simulaciones. Los resultados mostraron una eficiencia del sistema del 85% y una potencia al freno máxima de 4 kW con una eficiencia del 31.5%, destacando la viabilidad del motor Stirling en diferentes climas.

Otro aspecto importante de estudio es la sostenibilidad ambiental y económica de sistemas de micro-CHP con motores Stirling mediante análisis del ciclo de vida (LCA) y costo del ciclo de vida (LCC). Stamford y colaboradores (2018) reportaron que bajo condiciones de alta eficiencia, estos sistemas son preferibles a las tecnologías convencionales, sin embargo, con eficiencias más realistas, no son competitivos en términos ambientales ni económicos, presentando mayores costos y peores impactos ambientales en algunos casos.

De las investigaciones realizadas por Qiu y colaboradores (2019), se diseñó un sistema micro-CHP basado en un motor Stirling capaz de proporcionar 1 kW de energía eléctrica con un 38% de eficiencia combustible-electricidad y 1.1 kW de energía térmica a 80°C. Este sistema utiliza un quemador de gas recuperado, un Stirling de Pistón Libre (FPSE por sus siglas en inglés), y un alternador lineal, empleando helio como

gas de trabajo. El diseño incluye mejoras en los componentes para reducir las pérdidas térmicas y aumentar la eficiencia del motor. En el estudio de Schneider y colaboradores (2020), se revisan los desarrollos comerciales y la investigación en sistemas CHP alimentados con biomasa y motores Stirling. Allí se identifican ventajas como la alta eficiencia térmica y bajas emisiones, pero también desafíos como la obstrucción por cenizas (que es una problemática común con sistemas de biomasa) y la necesidad de altas temperaturas para el suministro de calor. En Ferreira y colaboradores (2020), se evaluó el motor Stirling comparando fuentes de energía externa como la solar y la biomasa. Usando MATLAB para el modelado térmico de un motor Stirling tipo alfa, los resultados mostraron que la biomasa provee 87.5% más energía de entrada que el sistema solar, con una eficiencia de 46.67%, demostrando una alta eficiencia térmica y evitando problemas de intermitencia de la energía solar.

Así mismo, González-Pino y colaboradores (2020), presentaron la validación de un modelo que usa gas natural en un calentador de un sistema CHP Stirling, mostrando que el modelo puede producir electricidad y agua caliente bajo condiciones normales con una diferencia promedio del 2% respecto a la experimentación real. Zhu y colaboradores (2021), revisaron los aspectos tecnológicos de los sistemas de generación de energía térmica y eléctrica con motores Stirling (CHP Stirling), evaluando el desarrollo comercial y la parte económica, así como los logros hasta la fecha y los trabajos futuros.

Investigaciones realizadas por Auñón-Hidalgo y colaboradores (2021), estudiaron una instalación que combina un módulo fotovoltaico y un colector solar térmico con un sistema micro CHP Stirling. Con el uso de baterías de Li-ion y un tanque de agua caliente, el sistema puede suministrar el 75.6% de la demanda energética de una casa, reduciendo las emisiones de CO₂ en un 36.3 %. Con un aumento de la capacidad de la batería, el sistema podría ser completamente autónomo.

En el estudio que realizaron de Voronca y colaboradores (2022), se caracterizó un sistema micro CHP Stirling que utiliza biomasa, mostrando que el flujo de transferencia de calor influye en la temperatura del agua suministrada. Se sugiere el uso de un tanque de almacenamiento de energía térmica para mantener la temperatura y mejorar la eficiencia del sistema.

Los sistemas de micro-CHP con motores Stirling ofrecen una alternativa viable para la generación combinada de calor y electricidad, con beneficios como alta eficiencia térmica y bajas emisiones. No obstante, existen desafíos técnicos y económicos que deben abordarse para mejorar la viabilidad de estos sistemas, como la mejora de la eficiencia y confiabilidad de los motores Stirling, la reducción de costos de componentes y la optimización de la integración con redes eléctricas y sistemas de calefacción existentes.

Calefacción y refrigeración

Se han realizado investigaciones que emplean al motor Stirling en sistemas de refrigeración y la generación de energía centradas en la optimización de bombas de calor Stirling, el análisis de refrigeradores Stirling tipo Beta y V, el modelado termodinámico de sistemas Stirling y la identificación de pérdidas en criocoolers Stirling. La influencia de parámetros geométricos, irreversibilidades internas y externas, fluidos de trabajo y pérdidas mecánicas en el rendimiento de los motores Stirling, la selección de fluidos de trabajo y el análisis de pérdidas mecánicas, son investigaciones que han contribuido al avance del conocimiento en el campo de los motores Stirling (Getie *et al.*, 2020).

Sistemas Híbridos con Motor Stirling

Existen pocas referencias en la literatura de sistemas de motor Stirling Híbridos que se pueden dividir en dos tipos de hibridación que usan motor Stirling, dependiendo de la fuente de calor o hibridación en la producción eléctrica.

Tipos de sistemas híbridos

Sistemas híbridos por la fuente de calor

Los sistemas híbridos por la fuente de calor no son comunes en la literatura o en aplicaciones industriales. Un sistema Stirling funciona con un rango de calor muy definido y por lo tanto la fuente de calor también se reduce a un tipo, pero en la literatura se localizó una propuesta de sistema con dos fuentes de calor distintas, se centra en evaluar el sistema de motor Stirling con calor mediante biomasa (pellets) y concentración solar (Ferreira *et al.*, 2020).

Sistemas generación eléctrica híbridos con motor Stirling

Normalmente los sistemas de generación eléctrica híbridos son de tipo solar fotovoltaica o eólico con otra fuente de generación, sin embargo, hasta hace poco no se había estudiado la integración

de un sistema Dish Stirling con otra tecnología de producción eléctrica. En este sentido, la investigación de Shboul y colaboradores (2021), destaca con un estudio sobre un sistema que muestra un sistema híbrido eólico–dish Stirling con resultados muy interesantes.

Selección de sistemas energéticos

Actualmente el grupo de investigación del Instituto Tecnológico de Sonora, trabaja en la optimización de un sistema de micro generación Stirling que opere de forma dual (con suministro solar-gas), con el fin de evitar la intermitencia. La idea es aprovechar durante el día la energía solar, y por la noche aprovechar los recursos de energía en forma de gas con los que cuenta el usuario como gas natural, gas LP o biogás y aprovechar las características de los motores Stirling de trabajar con calor externo, su buena eficiencia y que el sistema opera de manera continua (ver Figura 3).

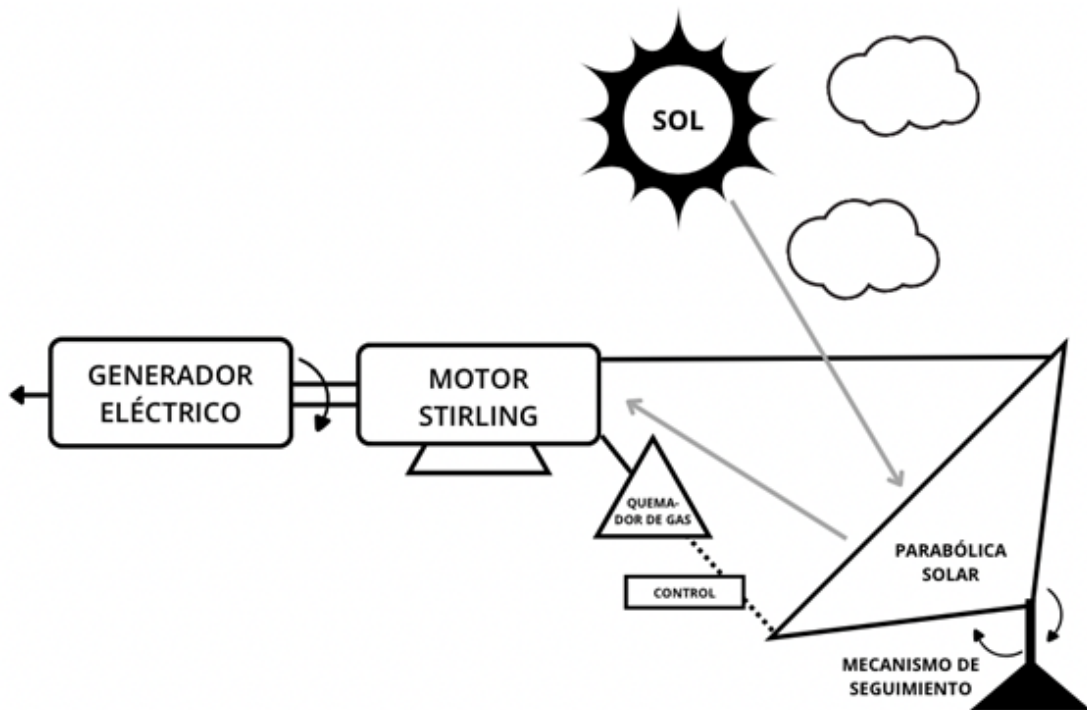


Figura 3. Sistema de generación eléctrica de entrada dual (híbrida) gas-solar (Elaboración propia).

Desafíos y Oportunidades

El motor Stirling posee un alto potencial para emplear en conjunto energía renovable y sustentable, aplicar tecnologías como la solar, criogénica y micro CHP Stirling. Sin embargo, aún quedan algunos desafíos por superar. Con el fin de aumentar la viabilidad de los motores Stirling, las investigaciones se deben dirigir a las problemáticas asociadas a fugas en los fluidos de trabajo, desarrollar un arranque robusto y un mecanismo sensible, de igual manera, minimizar el calor requerido, la pérdida de potencia y lograr más eficiencia en la operación (Ahmed *et al.*, 2020).

Mantenimiento de los motores Stirling.

La simplicidad mecánica del motor Stirling reduce la necesidad de mantenimiento y prolonga su vida útil en comparación con otros sistemas de generación de energía.

Mantenimiento de los SDS

Se recomienda realizar una inspección y limpieza del concentrador periódicamente, así como los componentes de recepción de energía para una operación óptima y eficiente, inspeccionar los niveles y que no existan fugas en el gas de trabajo. De igual forma, se recomienda monitorear que el generador esté cargando adecuadamente, la distribución de flujo de calor, la superficie del receptor y el funcionamiento del SDS (Zayed *et al.*, 2020).

Mantenimiento de los sistemas CHP Stirling

Realizar inspecciones de periódica para detección de desgaste, fugas o algunos problemas que puedan afectar el sistema, retirar contaminantes en los componentes regularmente de la acumulación de hollín, lubricar las partes móviles. La transferencia de calor se debe inspeccionar, que no se presenten fugas de gas de trabajo y que el generador esté cargando correctamente.

Lo anterior es requerido para mantener la eficiencia y la buena operación del equipo (Zhu *et al.*, 2021).

Costos.

Costos de los SDS

Los costos directos calculados en Zayed y colaboradores (2021) de los sistemas dish Stirling (SDS), incluyendo el plato concentrador, es de 350 USD/m², el motor Stirling y generador 400 USD/kW, la cavidad receptora es de 220 USD/kW. El costo aproximado de producción de energía con un sistema dish Stirling está entre 0.115 y 0.256 USD/kWh. En cuanto a costos indirectos, como la construcción, se considera del 16% de los costos directos, así como la reparación y mantenimiento alcanza los 40 USD/kW-Año con un tiempo de vida de 30 años.

Costo de los sistemas CHP

En Ferreira y colaboradores (2017), se desarrolló una metodología para optimizar los sistemas micro CHP Stirling desde el punto de vista térmico y económico. De los resultados se obtiene que la solución óptima (técnico-económica) usando su metodología es una planta de 3.61 kWp eléctricos y 9.65 kWp térmicos, con un costo total de inversión de 18,059 Euros. En otro estudio de Ferreira y colaboradores (2020) se estudian dos sistemas CHP Stirling uno alimentado por biomasa y otro por energía solar concentrada. El costo de inversión del sistema solar es de 0.166 euros/kWh, mientras que el de biomasa es de 0.109 euros/kWh. La ventaja del sistema basado en biomasa es que puede proveer una potencia de salida con una alta eficiencia térmica y que evita los problemas que normalmente están relacionados con la intermitencia de la energía solar.

Conclusiones

El capítulo ofrece una visión detallada de la evolución, diseño y aplicaciones de los motores

Stirling, destacando su relevancia en el contexto de sostenibilidad y eficiencia energética. Las investigaciones se han centrado en la optimización del rendimiento termodinámico, explorando variables como el volumen muerto y la efectividad del regenerador, la integración de materiales avanzados y tecnologías para mejorar la eficiencia y durabilidad del motor. En términos de aplicaciones, los motores Stirling son utilizados en sistemas de generación de energía, refrigeración y cogeneración de calor y electricidad (micro-CHP). Estos sistemas no solo mejoran la eficiencia energética, sino que también contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Estudios recientes han demostrado su potencial para alcanzar altos niveles de eficiencia térmica y fiabilidad operativa, sin embargo, a pesar de los avances, el capítulo identifica brechas en el conocimiento, como la necesidad de una mejor optimización de los parámetros de diseño y la selección adecuada de materiales.

También se resalta la importancia de reducir los costos de inversión para aumentar la viabilidad comercial de los sistemas basados en motores Stirling. En conclusión, los sistemas híbridos que utilizan el motor Stirling representan una tecnología con un enorme potencial para contribuir a un futuro energético más sostenible y eficiente. Las investigaciones y desarrollos continuos en este campo son esenciales para superar los desafíos técnicos y económicos, y así lograr una implementación más amplia y efectiva de esta tecnología en diversas aplicaciones industriales y residenciales.

Agradecimientos

A la red RIETI-CYTED justamente por permitirnos compartir experiencias en el campo de las energías renovables y enriquecernos con los conocimientos aportados por los estudios desarrollados en las instituciones integrantes. Al Dr. Santiago Veiga por su apoyo al efectuar el arbitraje, reconociendo su esfuerzo y sus observaciones a este documento.

Referencias

- Ahmed, F., Huang, H., Ahmed, S., & Wang, X. (2020). A comprehensive review on modeling and performance optimization of Stirling engine. *International Journal of Energy Research*, 44(8), 6098–6127. <https://doi.org/10.1002/er.5214>
- Arslan, T. A. (2023). A Comprehensive Review on Stirling Engines. *Engineering Perspective*, 3(3), 42–56. <https://doi.org/10.29228/eng.pers.66847>
- Auñón-Hidalgo, J. A., Sidrach-de-Cardona, M., & Auñón-Rodríguez, F. (2021). Performance and CO2 emissions assessment of a novel combined solar photovoltaic and thermal, with a Stirling engine micro-CHP system for domestic environments. *Energy Conversion and Management*, 230, 113793. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113793>
- Buscemi, A., Guarino, S., Ciulla, G., & Lo Brano, V. (2021). A methodology for optimisation of solar dish-Stirling systems size, based on the local frequency distribution of direct normal irradiance. *Applied Energy*, 303, 117681. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117681>
- Buscemi, A., Lo Brano, V., Chiaruzzi, C., Ciulla, G., & Kalogeri, C. (2020). A validated energy model of a solar dish-Stirling system considering the cleanliness of mirrors. *Applied Energy*, 260, 114378. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114378>
- Cheng, C.-H., Tan, Y.-H., & Liu, T.-S. (2021). Experimental and Dynamic Analysis of a Small-Scale Double-Acting Four-Cylinder α -Type Stirling Engine. *Sustainability*, 13(15), 8442. <https://doi.org/10.3390/su13158442>

- Çinar, C., Aksoy, F., & Erol, D. (2012). The effect of displacer material on the performance of a low temperature differential Stirling engine: The investigation of an LTD Stirling engine. *International Journal of Energy Research*, 36(8), 911–917. <https://doi.org/10.1002/er.1861>
- Cinar, C., Yucesu, S., Topgul, T., & Okur, M. (2005). Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure. *Applied Energy*, 81(4), 351–357. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.08.004>
- De La Bat, B. J. G., Dobson, R. T., Harms, T. M., & Bell, A. J. (2020). Simulation, manufacture and experimental validation of a novel single-acting free-piston Stirling engine electric generator. *Applied Energy*, 263, 114585. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114585>
- Ferreira, A. C., Nunes, M. L., Teixeira, J. C. F., Martins, L. A. S. B., Teixeira, S. F. C. F., & Nebra, S. A. (2017). Design of a solar dish Stirling cogeneration system: Application of a multi-objective optimization approach. *Applied Thermal Engineering*, 123, 646–657. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.127>
- 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*, 154, 581–597. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.020>
- Getie, M. Z., Lanzetta, F., Bégot, S., Admassu, B. T., & Hassen, A. A. (2020). Reversed regenerative Stirling cycle machine for refrigeration application: A review. *International Journal of Refrigeration*, 118, 173–187. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.06.007>
- González-Pino, I., Pérez-Iribarren, E., Campos-Celador, A., Terés-Zubiaga, J., & Las-Heras-Casas, J. (2020). Modelling and experimental characterization of a Stirling engine-based domestic micro-CHP device. *Energy Conversion and Management*, 225, 113429. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113429>
- Hachem, H., Gheith, R., Aloui, F., & Ben Nasrallah, S. (2018). Technological challenges and optimization efforts of the Stirling machine: A review. *Energy Conversion and Management*, 171, 1365–1387. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.042>
- Hosotani, K., & Nakatani, K. (2014). Development of an Acrylic Stirling Engine for Engineering Education and Simple Method for Visualizing Temperature Distributions.
- Kaldehi, B. J., Keshavarz, A., Safaei Pirooz, A. A., Batooei, A., & Ebrahimi, M. (2017). Designing a micro Stirling engine for cleaner production of combined cooling heating and power in residential sector of different climates. *Journal of Cleaner Production*, 154, 502–516. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.006>
- Luo, X., Wang, X., Yan, C., Zhang, A., Zhang, X., & Ye, W. (2024). Performance prediction and parametric optimization of γ -type free piston Stirling engine. *Thermal Science*, 28(1 Part A), 269–281. <https://doi.org/10.2298/TSCI230709232L>
- Qiu, S., Gao, Y., Rinker, G., & Yanaga, K. (2019). Development of an advanced free-piston Stirling engine for micro combined heating and power application. *Applied Energy*, 235, 987–1000. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.036>

- Rodríguez Sosa, G. (2019). Diseño, Construcción e Instrumentación de un Motor Stirling tipo Alfa.ITESCA.
- Schneider, T., Müller, D., & Karl, J. (2020). A review of thermochemical biomass conversion combined with Stirling engines for the small-scale cogeneration of heat and power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110288>
- Shaikh, P. H., Lashari, A. A., Leghari, Z. H., & Memon, Z. A. (2021). Techno-enviro-economic assessment of a stand-alone parabolic solar dish Stirling system for electricity generation. *International Journal of Energy Research*, 45(7), 10250–10270. <https://doi.org/10.1002/er.6513>
- Shboul, B., AL-Arifi, I., Michailos, S., Ingham, D., AL-Zoubi, O. H., Ma, L., Hughes, K., & Pourkashanian, M. (2021). Design and Techno-economic assessment of a new hybrid system of a solar dish Stirling engine integrated with a horizontal axis wind turbine for microgrid power generation. *Energy Conversion and Management*, 245, 114587. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114587>
- Shendage, D. J., Kedare, S. B., & Bapat, S. L. (2011). An analysis of beta type Stirling engine with rhombic drive mechanism. *Renewable Energy*, 36(1), 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.041>
- Singh, U. R., & Kumar, A. (2018). Review on solar Stirling engine: Development and performance. *Thermal Science and Engineering Progress*, 8, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.08.016>
- Stamford, L., Greening, B., & Azapagic, A. (2018). Life cycle environmental and economic sustainability of Stirling engine micro-CHP systems. *Energy Technology*, 6(6), 1119–1138. <https://doi.org/10.1002/ente.201700854>
- Voronca, Ștefan-D., Siroux, M., & Darie, G. (2022). Experimental Characterization of Transitory Functioning Regimes of a Biomass Stirling Micro-CHP. *Energies*, 15(15), 5547. <https://doi.org/10.3390/en15155547>
- Zare, S., Tavakolpour-saleh, A. R., Aghahosseini, A., Sangdani, M. H., & Mirshekari, R. (2021). Design and optimization of Stirling engines using soft computing methods: A review. *Applied Energy*, 283, 116258. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116258>
- Zayed, M. E., Zhao, J., Elsheikh, A. H., Li, W., & Elaziz, M. A. (2020). Optimal design parameters and performance optimization of thermodynamically balanced dish/Stirling concentrated solar power system using multi-objective particle swarm optimization. *Applied Thermal Engineering*, 178, 115539. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115539>
- Zayed, M. E., Zhao, J., Elsheikh, A. H., Li, W., Sadek, S., & Aboelmaaref, M. M. (2021). A comprehensive review on Dish/Stirling concentrated solar power systems: Design, optical and geometrical analyses, thermal performance assessment, and applications. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124664>

Zayed, M. E., Zhao, J., Elsheikh, A. H., Zhao, Z., Zhong, S., & Kabeel, A. E. (2021). Comprehensive parametric analysis, design and performance assessment of a solar dish/Stirling system. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 276–291. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.007>

Zayed, M. E., Zhao, J., Li, W., Elsheikh, A. H., Zhao, Z., Khalil, A., & Li, H. (2020). Performance prediction and techno-economic analysis of solar dish/stirling system for electricity generation. *Applied Thermal Engineering*, 164, 114427. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114427>

Zhu, S., Yu, G., Liang, K., Dai, W., & Luo, E. (2021). A review of Stirling-engine-based combined heat and power technology. *Applied Energy*, 294, 116965. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116965>

Manuscrito recibido: 12 de agosto de 2024

Recepción del manuscrito corregido: 8 de octubre de 2024

Manuscrito aceptado: 18 de octubre de 2024