

Design of a Stirling engine prototype based on solar energy

Juan Manuel Peralta Jaramillo, PhD¹, Emérita Delgado Plaza, Ph.D¹, Jorge Hurel Ezeta Ph.D¹
Hugo Albarracín, Ing¹, Diego Guevara Ing¹.

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencia de la Producción
Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable, Campus Gustavo Galindo Km. 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-
5863 Guayaquil - Ecuador

jperal@espol.edu.ec, ¹ eadelg@espol.edu.ec¹, hugroalb@espol.edu.ec¹, dgguevar@espol.edu.ec ec

Abstract— *The Stirling engine is considered as the engine closest possible thermal to the performance of Carnot Cycle. The Solar Stirling engines, propose to use solar radiation as heat source for electric power generation, instead of use fossil fuels. This article presents the design of a Stirling engine that runs on solar energy using CFD techniques in order to determine the temperatures in the solar receiver and in the energy dissipation zone knowing the temperatures were calculated working pressures and with this the forces of gas expansion, with these forces it They dimensioned the mechanical elements that make up the engine Stirling.*

Keywords- *thermal cycle, Stirling engine, CFD, solar energy.*

Digital Object Identifier (DOI):<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.298>
ISBN: 978-0-9993443-1-6
ISSN: 2414-6390

Diseño de un prototipo de motor Stirling basado en energía solar

Juan Manuel Peralta Jaramillo, PhD¹, Emérita Delgado Plaza, Ph.D¹, Jorge Hurel Ezeta Ph.D¹
Hugo Albarracín, Ing¹, Diego Guevara Ing¹.

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencia de la Producción
Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable, Campus Gustavo Galindo Km. 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-
5863 Guayaquil - Ecuador

jperal@espol.edu.ec,¹ eadelg@espol.edu.ec¹, hugroalb@espol.edu.ec¹, dgguevar@espol.edu.ec¹

Abstract— El motor Stirling es considerado como el motor térmico más cercano posible al rendimiento de Ciclo de Carnot. Los motores Stirling solares, proponen utilizar la radiación solar como fuente de calor para la generación de energía eléctrica, en lugar de utilizar combustibles fósiles. En este artículo se presenta el diseño de un motor Stirling que funcione con energía solar empleando técnicas CFD con el fin de determinar las temperaturas en el receptor solar y en la zona de disipación de energía conociendo las temperaturas se calcularon las presiones de trabajo y con esto las fuerzas de expansión de los gases, con estas fuerzas se dimensionaron los elementos mecánicos que constituyen el motor Stirling.

Keywords—ciclo térmico, motor Stirling, CFD, energía solar.

I. INTRODUCTION

El uso de derivados de petróleo dentro de las actividades humanas ha venido produciendo de manera paulatina una serie de impactos, lo cuales están directamente asociados a la degradación del bioma planetario, afectando la calidad de vida en varias zonas del planeta. Derivado de este problema, la sociedad ha venido desarrollando e implementando una serie de avances tecnológicos que permitan la generación energía por medio de recursos renovables, con el fin de reducir la dependencia energética de combustibles fósiles [1]

Dentro de este marco, la conversión de energía (electricidad o fuente de calor) es hoy en día un parámetro fundamental para nuestra vida diaria y para nuestra capacidad de producción y desarrollo. Sin embargo, todavía existen núcleos poblacionales remotos o aislados con un déficit alto de energía, por lo que, cualquier forma de energía será extremadamente cara, afectando la forma de vida de los usuarios y de sus entornos por la búsqueda permanente de energía para sus hogares [2]

Dentro de este contexto, el Ecuador, ha impulsado los últimos años una política que tiene como meta el desarrollo sostenible del país, y dentro de sus objetivos esta lograr la diversificación de la matriz energética nacional basada tradicionalmente en fuentes convencionales de energía, por una que pueda sustentarse por medio de recursos renovables autóctonos (hídrica, solar, eólica biomasa y geotermia). [3] [4]

Esta necesidad de cambio de fuente de generación energética, se base en tres aspectos de interés para el gobierno nacional [4]:

- Aumento progresivo de la demanda de petróleo y sus paulatina disminución de producción
- El cambio Climático y su afectaciones
- Seguridad Energética enmarcado en la Constitución vigente

Las energías renovables son un elemento fundamental para conseguir una transición o posterior transformación energética que permitan obtener un modelo de desarrollo sostenible. Hoy en día es necesario encontrar o lograr soluciones socialmente aceptables y económicamente viables que permitan la diversificación de la matriz energética, amigable con el ambiente y que contribuyan a la reducción sensiblemente la emisión de gases de efecto invernadero, en este marco las energías renovables es un candidato ideal para lograr este cambio de paradigmas. [2]

Visto de esta perspectiva, la adaptación de tecnologías que puedan emplear fuentes de energía renovables es cada de día de mayor demanda. En este sentido, el motor Stirling además de ser el motor térmico cuyo ciclo puede proporcionar el rendimiento más cercano posible al rendimiento de Ciclo de Carnot, puede ser adaptado para que pueda utilizar la radiación solar como fuente de calor para la generación de energía eléctrica, en lugar de utilizar procesos convencionales. Este sistema se encuentra a la fecha en la etapa de escalonamiento industrial y desde el 2010 existen proyectos con fines de comercialización alrededor de todo el mundo. [1] [5]

También se debe considerar la dependencia que presentan los sistemas basados en energía solar a la radiación directa, por ejemplo el aumento de la nubosidad reduce el desempeño del sistema debido a la predominancia de la radiación difusa sobre la directa; el segundo inconveniente es el costo elevado de mantenimiento y construcción, esto se debe al uso de materiales especiales y los mecanismos de seguimiento solar que operan de forma continua; finalmente, el tercer inconveniente se deriva del tamaño de los campo de captación de energía, por lo cual,

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.298>
ISBN: 978-0-9993443-1-6
ISSN: 2414-6390

son necesarias áreas grandes de gran insolación como zonas desérticas o áridas. [6]

II. PROBLEMÁTICA

En el caso particular del Ecuador, el sistema de distribución de electricidad basa en un esquema centralizado y unificado con un alto grado de penetración de distribución, sin embargo el actual modelo de matriz energética nacional recomienda la migración a sistemas de generación distribuida de eléctrica que provenga de fuentes renovables en los puntos donde no exista cobertura, en este aspecto, los motores Stirling serían una alternativa viable para sustituir los sistemas convencionales de energía. Sin embargo, la adquisición de materiales para su construcción representa un obstáculo en su elaboración, debido a que no son producidos en la industria nacional, por lo cual se incrementan los costos de manufactura, ya que se tienen que importar materiales, y esto reduce la rentabilidad del proyecto. [4]

III. RECURSO SOLAR EN EL ECUADOR

Ecuador se localiza al noroeste de Sudamérica y sus costas están bañadas por el océano Pacífico. La línea equinoccial o ecuatorial cruza el país, y por ende se sitúa geográfica en la zona intertropical, entre los meridianos 75° 11' y 81° 01' de longitud este, y entre los paralelos 1° 21' de latitud norte y 5° de latitud sur [6]

Los primeros datos sobre insolación registrados en el Ecuador corresponden a los registrados por las estaciones meteorológicas del INAMHI. Estos registros desde 1962 contienen información sobre insolación global (Wh/m²/día) y heliofanía (h/día) en forma muy dispersa. A partir de esta información se ha elaborado el primer “Estudio del Potencial Solar y Eólico del Ecuador” realizado por el INECEL (Instituto Nacional Ecuatoriano de Electrificación) y el INE (Instituto Nacional de Energía), ambos desaparecidos actualmente. Este estudio recopiló la información desde el año 1968 hasta el año 1980. [6] [7] [8]

EN el año 2005, el Proyecto OPET América ejecutado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), estimo que el país existe una radiación media es de alrededor de 3-4 kWh/m²/día preliminarmente. En la Tabla 1 se muestran los valores medios estimados por región [8]

Tabla 1.
Potencial Solar del Ecuador

Región	Radiación Media kWh/m ² año.
Costa	4.5.
Sierra	3.5.
Oriente	3.8.
Galápagos	4.5

Finalmente, en el 2008 por solicitud del entonces CONELEC se elaboró el “Atlas Solar con Fines de Generación Eléctrica”,

el cual está basado los datos de radiación solar generada por el Centro Nacional Renewable Energy Laboratory – NREL de los Estados Unidos, empleando el modelo CRS (Climatological Solar Radiation Model). [6]

Adicionalmente, se ha realizado el estudio del modelaje de la radiación solar empleando el modelo de mesoescala “Weather Research and Forecasting Model (WRF), el cual permite modelar y representar las variables de la atmósfera (viento, presión, temperatura, radiación, entre otras.) en una malla tridimensional, con alto grado de resolución espacial. Los resultados obtenidos de este trabajo estiman que la radiación solar media en la región Sierra es 4.5 kWh/m² día, con una mayor incidencia al sur de la región. En la costa la media estimada es de 3.5 kWh/m² día, con mayor incidencia en el perfil costero y en el interior de la región central. Finalmente la región oriental presenta un comportamiento espacial más estable con una radiación media estimada de 3.25 kWh/m² día. (Fig 1) [6]

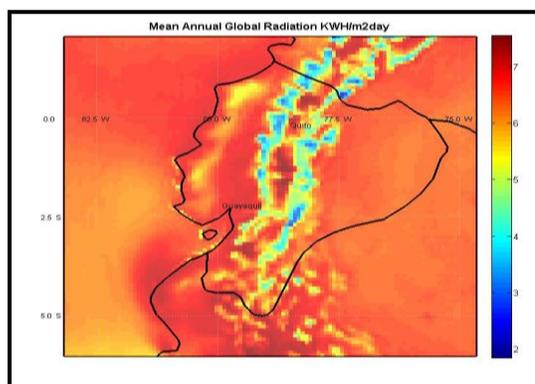


Fig. 1 Promedio Anual de Radiación Solar (WRF)

Dicho esto se puede entender, que la radiación solar media del Ecuador Continental está por encima de los 3 kWh/m²año, siendo este valor medio el que deberá considerarse al momento del diseño preliminar de sistemas de captación de energía solar.

III. MARCO TEÓRICO

Un motor Stirling es un motor de combustión externa de ciclo cerrado creado en 1816 por Robert Stirling que puede trabajar con un fluido atrapado en un contenedor que será el que realice el trabajo sobre los pistones, mientras que externamente se da la transferencia de calor hacia el sistema, y ésta puede provenir de combustibles fósiles, aire caliente, radiación solar, reacciones químicas o nucleares. Al igual que cualquier motor, trabaja en cuatro tiempos: Compresión, calentamiento, expansión y enfriamiento. [1] [9]

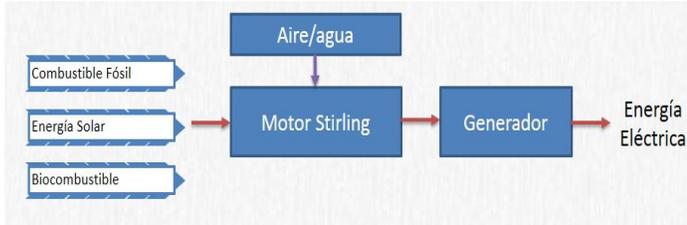


Fig 2. Esquema de trabajo de un motor Stirling Solar

El ciclo ideal Stirling se compone de dos procesos isotérmicos y de dos procesos de regeneración a volumen constante ver Fig 3, en el proceso de regeneración se transfiere calor desde el fluido de trabajo hacia un dispositivo de almacenamiento de energía térmica durante una parte del ciclo y se la devuelve en otra parte del ciclo. [9] [10]

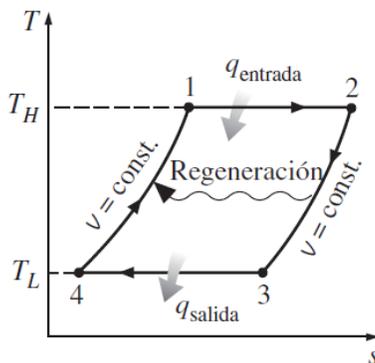


Fig 3. Ciclo Stirling en un diagrama T-S
Fuente: (Cengel, 2012)

EL motor Stirling está compuesto de dos compartimentos cuya función es transferir el fluido de trabajo con el fin de lograr los procesos de expansión y compresión. Sin embargo, ese resultado puede obtenerse por medio de diferentes configuraciones asociadas el pistón y los mecanismos de desplazamiento, En la práctica el motor puede ser del tipo Alfa, Beta y Gamma. [9] [11]

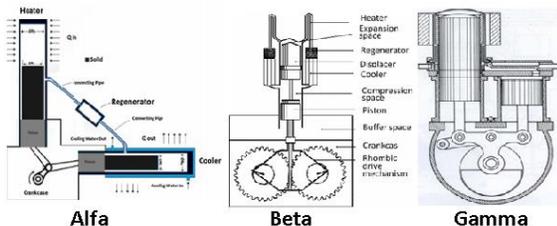


Fig 4. Tipos de Motores Stirling

El colector solar es la superficie reflectante que concentra toda la radiación solar directa incidente en un solo punto. La geometría del colector es necesariamente un paraboloide, dado que mediante la propiedad óptica de la parábola es posible esta aplicación. Esta propiedad geométrica establece que un rayo paralelo al eje que contiene al foco y al vértice de la parábola

incidente sobre cualquier punto dentro de la concavidad de la parábola se reflejará hacia el foco de dicha parábola. [12]

El colector solar es una de las partes más importantes ya que de este depende la energía que llegue al receptor acoplado al motor Stirling. Existen varios diseños y tecnologías asociados al disco parabólico solar, pero en la práctica se puede clasificar por ser elaborado a partir de membranas de metal o espejos planos, su selección dependerá de la facilidad de materiales locales y el clima de la zona.

Otro elemento a seleccionar es el receptor de radiación directa, el cual recibe la radiación solar en un solo punto de una placa plana, transfiriendo el calor directamente al fluido mediante conducción y convección.

IV. DISEÑO DEL PROTOTIPO

A partir de la revisión bibliográfica se decide que los componentes del motor solar Stirling serán: Motor Beta Stirling, disco reflector de membranas de metal, y receptor solar por radiación directa. [12] [13] [14]

Diseño del disco reflector

El diseño se basa en un paraboloide truncado de tal manera que el foco quede situado a una distancia prudencial, que permita la recepción de los rayos solares reflejados. Utilizando la ecuación de la parábola se determina que el diámetro del disco reflector debe ser aproximadamente de 2m.

Diseño del receptor solar

El diseño del receptor solar se lo determina mediante simulaciones de la transferencia de calor ocurrida desde el exterior (flujo externo) al interior del material que lo compone (flujo interno).

Diseño del motor Stirling

El dimensionamiento del motor Beta se basa en definir el área interna del cilindro que es la variable determinante para la fuerza de presión que ejercen los gases sobre el pistón y con ello conseguir el movimiento del sistema. A partir de los datos obtenidos de la transferencia de calor hacia el gas en las simulaciones se procede a calcular empleando las propiedades termodinámicas la presión que se ejercerá sobre los pistones.

V. SIMULACIONES

El proceso de simulación nos permitirá cuantificar los efectos correspondientes a la reflexión de la radiación, grado de concentración focal, transferencia de calor al fluido de trabajo y análisis del comportamiento dinámico del mecanismo. El módulo de simulación de dinámica de fluidos computacional empleado es el FlowSimulation perteneciente al programa Solidworks.

Como primer paso se estableció las condiciones iniciales y bordes para el modelo y simulación de la interacción entre el disco y el captador.

Condiciones ambientales:

Presión ambiente: 101325.00 Pa
 Temperatura ambiente: 293 K
 Velocidad de viento: $V_x=V_y=V_z=1.5$ m/s

Condiciones de iniciales:

Disco parabólico:
 -Temperatura inicial: 293K
 -Fuente de radiación: 750 W/m²
 -Reflectividad: 83%

Colector Solar:
 -Temperatura inicial: 293K

Los materiales seleccionados se citan a continuación:

- Colector solar: Plancha de Aluminio reflectivo 1060
- Receptor Solar: Acero ASTM A36
- Empaque: Asbesto
- Cilindro de trabajo: Acero ASTM A36

En la figura 5, se muestra modelo tridimensional elaborado para la simulación incorporando el panel reflector y el colector.

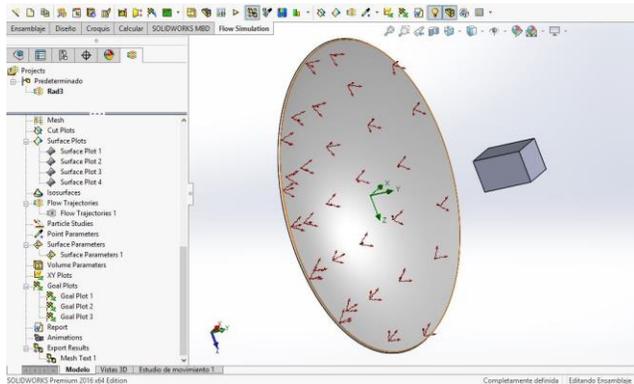


Fig 5. Modelado del colector y del receptor solar

La simulación de la reflexión de la radiación solar se la realizó considerando la radiación diaria medida en la estación meteorológica de la FIMCP- ESPOL Guayaquil. El valor promedio de las series temporales de radiación es de 750 w/m²; adicionalmente se consideró como estado estable y flujo externo (sin dependencia del tiempo), obteniendo una temperatura de estabilización alrededor de los 898 K, las figuras siguientes se muestra distribución de temperatura alrededor de la placa del receptor solar [15] [14] [16] [17]

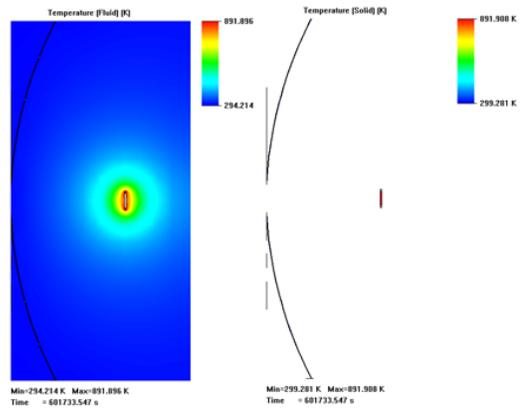


Fig 6. Distribución de temperatura focal

A continuación, se realizó una nueva simulación en estado transiente, para lo cual se consideró una serie temporal de radiación solar correspondiente a los meses de mayor incidencia de radiación solar en el horario de 10:00 a 16:00. Se determinó que la temperatura de la placa del receptor solar se estabiliza a 840 K. [15] [18]

Establecida la temperatura en la placa receptora se procede a realizar la simulación del cilindro, considerando que el calor fluye a través de la pared delgada y se propaga por el fluido de trabajo con el fin de provocar el respectivo movimiento de los pistones. En la Figura 7, se muestra la distribución de temperatura en la pared interna del cilindro, el calor fluye por la pared delgada por conducción térmica y también se calienta por la temperatura del gas, disipándose a través de aletas en la zona de compresión manteniendo una baja la temperatura. Este gradiente de temperatura origina el desplazamiento del pistón para la generación de trabajo.

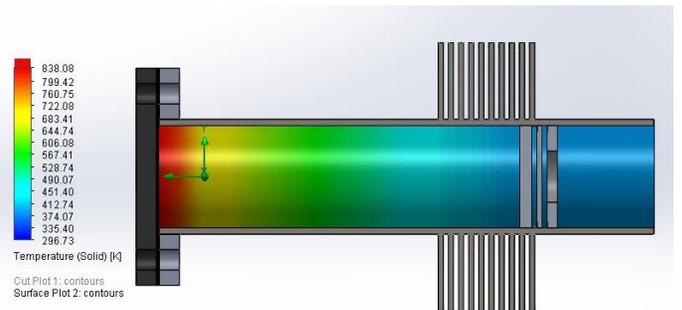


Fig 7. Distribución de temperatura en pared interna del cilindro

La Figura 8, muestra la distribución de temperatura del gas a medida que avanza a lo largo de la longitud del cilindro, logrando la expansión en la cámara y la estabilización de la temperatura del gas. A partir de este análisis podemos decir que la temperatura alcanzada en la placa del receptor como una constante durante la expansión, tal como se indica en el ciclo termodinámico mostrado en la Figura 3. El gas utilizado es Helio debido a la eficiencia que se consigue por su capacidad calorífica. [15] [14] [16]

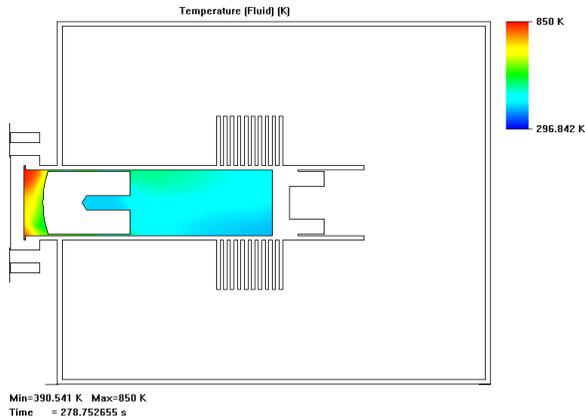


Fig. 8. Distribución de temperatura en el gas en el interior de la cámara

Volumen, presión y potencia del motor Stirling

Los volúmenes de las cámaras de expansión y compresión varían de acuerdo con el ángulo en que se encuentra la manivela del pistón de potencia. En la Figura 9, se representa la variación del volumen en relación al ángulo de giro, donde se puede observar el comportamiento sinusoidal de la variación volumétrica se debe al mecanismo biela-manivela, siendo la suma el volumen total.

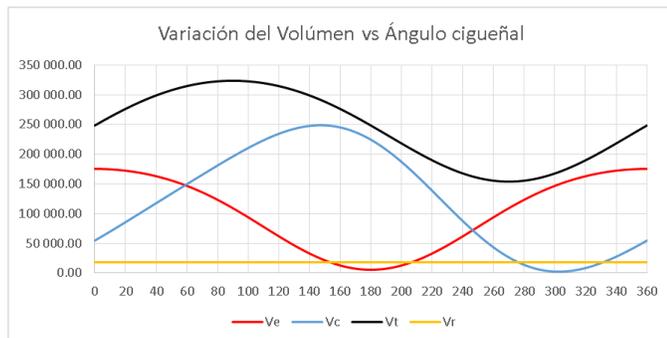


Fig. 9 Volumen total, volumen de expansión y volumen de compresión

En la figura 10, se muestra la simulación del ciclo termodinámico real; incluyendo los puntos de críticos de presión y volumen determinados por ciclo termodinámico ideal. El área dentro de la gráfica representa el trabajo neto realizado por una revolución de la manivela.

Posteriormente, se determina los trabajos realizados en las carreras de potencia y retorno. En la figura 11, se muestran los trabajos de expansión, compresión y total en el cilindro.

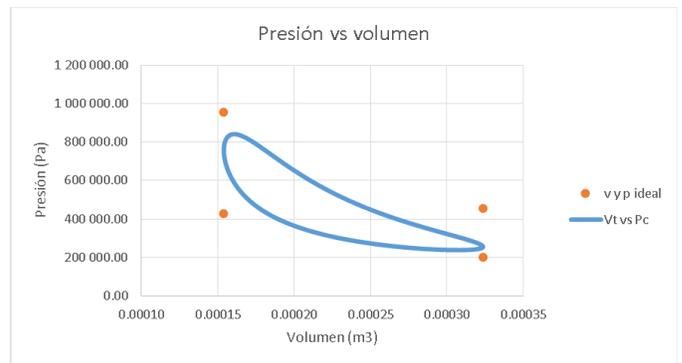


Figura 10. Ciclo termodinámico real y presiones ideales

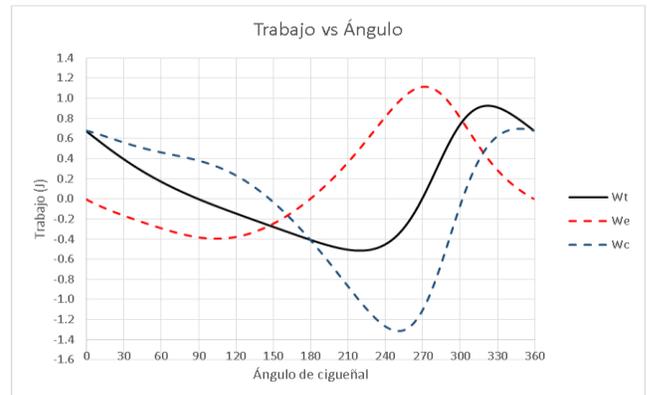


Fig. 11 Trabajo termodinámico de expansión, compresión y total

La disipación de calor en el motor Stirling, se basa en el principio de convección libre en la zona fría o de compresión con el fin de mantener la temperatura de compresión en un valor bajo, a 350 K por medio de un sistema de aletas. Para su diseño se establecen las dimensiones de las aletas según la Tabla 3.1. Con las cuales se determina las áreas de disipación de calor. [9] [16]

TABLA II
DIMENSIONES Y PARÁMETROS DE LAS ALETAS

h (w/m ²)	20
r ₁ (mm)	32,5
L (mm)	50
r ₂ (mm)	82,5
t(mm)	1,5
N	14
H (mm)	50
nf	0,950
qt (w)	1987,27

Las simulaciones del comportamiento del motor se realizan considerando las siguientes condiciones: estado estable, conducción radial unidimensional en las aletas, propiedades constantes, intercambio de radiación despreciable con los

alrededores y un coeficiente de convección constante sobre toda la superficie. Del análisis, de los resultados obtenidos por la simulación se logró estimar que la tasa de transferencia de calor por la disipación de calor por medio de las aletas es 1987 W, los resultados demostrados que serían suficientes 14 aletas mantener la temperatura fría de la cámara de compresión.

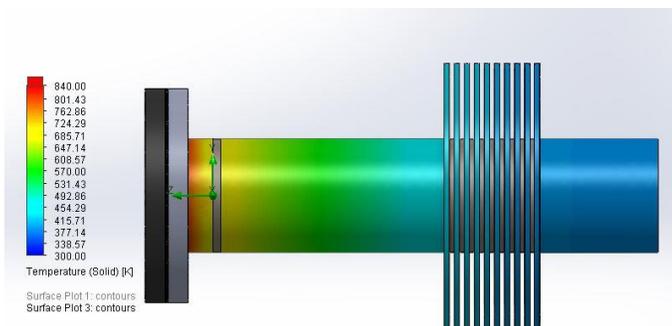


Fig. 2 Temperatura en aletas del motor Stirling

Otro punto que se consideró en el trabajo fue el diseño mecánico de los elementos y accesorios del sistema acorde a los materiales existentes en el país. Cabe destacar que el diseño se basa en análisis de carga por presión y por variación de temperatura.

Los elementos diseñados fueron: Sistema de soporte y movimiento del paraboloide, Colector solar y el Motor Stirling. [19]

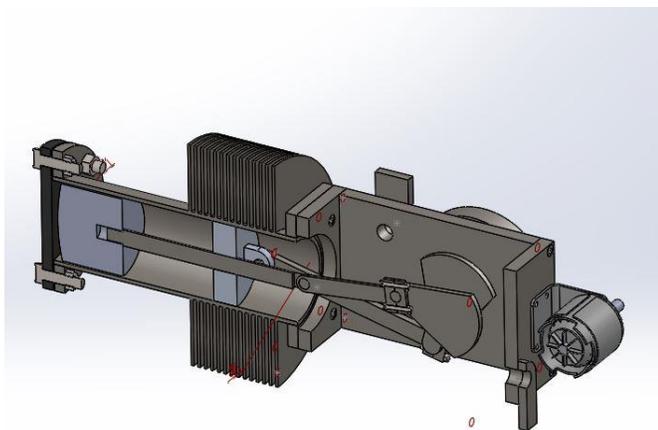


Fig 13. Motor Stirling vista de corte



Fig 14. Disco parabólico y motor Stirling. Ensamble completo

VI MATERIALES Y COSTOS

Para la construcción del sistema de soporte será necesarios varias platinas, un tubo rectangular, un tubo redondo de diámetro 60mm cédula 40, un espárrago M16 con el cual se realizará el movimiento del paraboloide correspondiente al seguidor solar y una platina rolada que será el soporte de la estructura del paraboloide. El soporte del paraboloide es una estructura hecha por platinas de 1 1/2"X1/4" y una varilla redonda doblada en zigzag para darle mayor rigidez a la estructura

El colector solar será elaborado de planchas triangulares roladas en forma de parábola. Finalmente, para la construcción motor Stirling, el conjunto mecánico de mayor complejidad del proyecto donde se tienen varios elementos, se destacan mayormente: el receptor solar las placas de soporte, el cigüeñal, las bielas y los pistones desplazador y de potencia, los cuales dentro de la camisa del motor realizan la expansión y contracción del gas de trabajo generando potencia.

Los costos asociados a los materiales y mano de obra para la elaboración de cada elemento se muestran en la tabla III

TABLA III
COSTOS POR ELEMENTOS DEL SISTEMA

Elementos	Valor (\$)
Sistema de soporte y movimiento del paraboloide	49,34
Colector solar	357,46
Motor Stirling.	265,75

VII CONCLUSIONES

El diámetro necesario del disco parabólico para la obtención de al menos 500W de potencia es de 2,5 m utilizando Helio como fluido de trabajo y un diámetro de 60 mm en el cilindro del motor Stirling.

Las pérdidas de energía en el prototipo de motor Stirling se deben principalmente al ciclo termodinámico real del motor que alcanza un 26% de eficiencia. Además, el uso de aletas permite mantener la temperatura baja de la cámara de compresión; también podría utilizarse la convección forzada para disipar el calor del cilindro, sin embargo, esto generaría una reducción de la potencia obtenida al final del proceso.

El costo total de la fabricación del equipo es \$750.55 considerando los precios de todos sus elementos en la industria nacional y el costo de la mano de obra por cada actividad a realizar en su elaboración.

El diseño mecánico de los elementos del motor Stirling se encuentra dentro de los parámetros de seguridad recomendado por las normativas técnicas internacionales vigentes. Su peso es relativamente bajo, por lo cual su peso y su inercia no representan un gran inconveniente para la resistencia de los materiales seleccionados

La eficiencia del motor se puede mejorar aumentando la precisión de las piezas del motor y la eficiencia de la fuente de calor.

VIII REFERENCIAS

- [1] H. Albarracín y G. Diego, *Diseño de un motor stirling basado en energía solar*, Guayaquil: ESPOL, 2017.
- [2] M. F. Coviello, «Estudio “Energía: Una visión sobre los retos y oportunidades en América Latina y el Caribe,» 2013.
- [3] A. Barriga, E. Delgado, J. Guevara y J. Peralta, *Introducción al Estudio de Fuentes Renovables de Energía*, Guayaquil: Iniciativa Latinoamericana de Libros de Texto Abiertos (LATIn), 2014.
- [4] Senplades, «Buen Vivir Plan Nacional,» 05 2016. [En línea]. Available: <http://www.buenvivir.gob.ec/agendas-zonales>.
- [5] D. Y. goswami y F. kreith, *Energy Efficiency and Renewable Energy*, CRC Press.
- [6] J. Peralta y A. Lopez, *TESE DE DOUTORAMENTO: Modelamiento Computacional del Recurso Solar y Eólico para aplicación de Sistemas de Energía Renovable*, Santiago de Compostela, 2015.
- [7] INE, Instituto Nacional de Energía, «Geografía Energética del Ecuador, Bases para la Caracterización energética de las Regiones Ecuatorianas,» Quito, 1981.
- [8] J. Peralta, A. López, E. Delgado, I. Sosa y A. Barriga, «Análisis estadístico de la información meteorológica para la explotación de energías renovables en el Ecuador,» de *Primer Congreso Internacional y Expo Científica Investigación Sostenible: Energías Renovables y Eficiencia Energética – ISEREE 2013*, Quito, 2013.
- [9] Y. A. Cengel, *Termodinámica*, The McGraw-Hill, 2012.
- [10] H. B. Callen, *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*, John Wiley & Sons, 1985.
- [11] V. Faires y C. Simmang, *Termodinámica*, Hispano Americana, 1982.
- [12] J. Duffie, *Solar Engineering of thermal processes*, Wiley, 2006.
- [13] A. Abbas Al-Dafaie y M.-E. Dahdolan, «Utilizing the heat rejected from a solar dish Stirling engine in potable water production,» *Solar Energy*, pp. 317-326, 2016.
- [14] A. Hafez, A. Soliman y K. El-Metwally, «Solar parabolic dish Stirling engine system design, simulation, and thermal analysis,» *Energy Conversion and Management*, vol. 126, 2016.
- [15] A. Hafez, A. Soliman, K. El-Metwally y I. Ismail, «Solar parabolic dish Stirling engine system design, simulation, and thermal analysis,» *Energy Conversion and Management*, pp. 60-75, 2016.
- [16] NASA, «Stirling Engine Design Manual,» Enero 1983. [En línea]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19830022057.pdf>.
- [17] J. A. C. González, *Centrales de Energía Renovable*, Pearson Education, 2009.
- [18] R. Ben-Mansour, A. Abuelyamen y E. M.A. Mokheimer, «CFD analysis of radiation impact on Stirling engine performance,» *Energy Conversion and Management*, vol. 152, 2017.
- [19] N. Robert, *Diseño de Maquinaria*, México:: Mc Graw Hill, 2011.