



**LOS LIBERTADORES**  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

**INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL DE SIMULACIONES Y  
APLICACIONES DE MOTORES STIRLING**

JUAN SEBASTIÁN MÉNDEZ DURANGO  
JOHAN SMITH ORJUELA LEGUIZAMÓN

INSTITUCION UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA  
BOGOTA D.C

2017

INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL DE SIMULACIONES Y APLICACIONES DE  
MOTORES STIRLING

JUAN SEBASTIÁN MÉNDEZ DURANGO  
JOHAN SMITH ORJUELA LEGUIZAMÓN

INSTITUCION UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA  
BOGOTA D.C

2017

INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL DE SIMULACIONES Y APLICACIONES DE  
MOTORES STIRLING

JUAN SEBASTIAN MENDEZ DURANGO  
JOHAN SMITH ORJUELA LEGUIZAMON

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO  
MECÁNICO

DIRECTOR  
ALEXANDER GARCIA MARIACA  
ING. MECANICO

INSTITUCION UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA  
BOGOTA D.C

2017

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C. 16 / 06 / 2017

Las directivas de la Fundación Universitaria los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN .....  | 8  |
| 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....   | 10 |
| 1.1 PROBLEMÁTICA DE INVESTIGACION EN COLOMBIA .....   | 10 |
| 1.2 SITUACIÓN ACTUAL CON RESPECTO A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES .....                          | 11 |
| 1.3 POSIBLE SITUACIÓN IDEAL PARA LA PROBLEMÁTICA POR COMBUSTIBLES FÓSILES .....             | 13 |
| 1.4 PUNTOS DE CONFLICTO DE SITUACIÓN IDEAL Y LA PROBLEMÁTICA POR COMBUSTIBLES FÓSILES ..... | 16 |
| 2 JUSTIFICACIÓN.....  | 18 |
| 3 OBJETIVOS.....  | 20 |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL .....  | 20 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....  | 20 |
| 4 MARCO REFERENCIAL .....   | 21 |
| 4.1 MARCO HISTORICO.....  | 21 |
| 4.2 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....  | 23 |
| 4.3 MARCO NORMATIVO .....   | 27 |
| 5 METODOLOGÍA .....   | 32 |
| 6 ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO .....  | 35 |
| 6.1 APLICACIONES .....  | 35 |
| 6.2 REVISIONES ORIENTADAS A SIMULACIONES .....  | 43 |
| 7 ANÁLISIS DE LA REVISIÓN .....   | 49 |
| 8 CONCLUSIONES .....  | 54 |
| 9 RECOMENDACIONES.....  | 56 |
| 10 Bibliografía .....   | 57 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| TABLA 1 - CONDENSACIÓN DE LEYES.....         | 27 |
| TABLA 2 - CONDENSACIÓN DE LEYES PARTE 2..... | 27 |
| TABLA 3 - CONDENSACIÓN DE LEYES PARTE 3..... | 28 |
| TABLA 4 - CONDENSACIÓN DE LEYES PARTE 4..... | 30 |
| TABLA 5 - CLASIFICACIÓN DE ARTÍCULOS.....    | 33 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1 - GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE COMBUSTIBLES<br>MUNDIALMENTE .....                | 12 |
| FIGURA 2- PRODUCCIÓN FISCALIZADA DE PETRÓLEO PROMEDIO DE<br>2016.....                          | 13 |
| FIGURA 3- HISTORIAL DE RESERVAS DE PETRÓLEO DE COLOMBIA.....                                   | 14 |
| FIGURA 4-- HISTORIAL DE RESERVAS DE GAS NATURAL DE COLOMBIA<br>.....                           | 14 |
| FIGURA 5- EFICIENCIA DE MOTOR STIRLING CON RESPECTO A<br>REVOLUCIONES ENTREGADAS.....          | 16 |
| FIGURA 6 - DIAGRAMAS T-S DE LOS CICLOS CARNOT Y STIRLING- .....                                | 24 |
| FIGURA 7 POSICIÓN DEL CILINDRO A LO LARGO DEL CICLO .....                                      | 24 |
| FIGURA 8- DIAGRAMA DE PROCESO PARA LA REVISIÓN DE UN<br>ARTICULO.....                          | 34 |
| FIGURA 9 - DELTA DE TEMPERATURAS EN FUNCIÓN DE LAS<br>REFERENCIAS .....                        | 49 |
| FIGURA 10 - EFICIENCIAS EN FUNCIÓN DE LAS REFERENCIAS .....                                    | 50 |
| FIGURA 11- RESULTADOS DE USOS DE FLUIDOS DE TRABAJO EN<br>SIMULACIONES.....                    | 51 |
| FIGURA 12 - RESULTADOS DE USOS DE FLUIDOS DE TRABAJO EN<br>APLICACIONES .....                  | 51 |
| FIGURA 13 - PORCENTAJE DE TIPOS DE MOTORES USADOS EN<br>SIMULACIONES PARA ESTE DOCUMENTO. .... | 52 |
| FIGURA 14- PORCENTAJE DE TIPOS DE MOTORES USADOS EN<br>APLICACIONES PARA ESTE DOCUMENTO.....   | 53 |

## GLOSARIO

**CALOR:** Energía transferida entre dos sistemas.

**CICLO STIRLING:** Ciclo térmico que implica una adición de calor isotérmico y un proceso de rechazo de calor isotérmico.

**ENERGIA:** Capacidad de producir trabajo por medio de un movimiento.

**MOTOR STIRLING:** Máquina térmica capaz de trabajar mediante proceso descrito por el ciclo Stirling.

**TRASFERENCIA DE CALOR:** Proceso en el cual se intercambia energía en forma de calor entre dos cuerpos mediante los mecanismos de conducción, convección o radiación.

**PRESIÓN:** Fuerza normal ejercida por un fluido o cuerpo por unidad de área.

**PROCESO:** Cambio experimentado por un estado que se encuentra en equilibrio a otro.

**PROCESO ISOTÉRMICO:** Proceso mediante el cual la temperatura permanece constante.

**PROCESO ISOCÓRICO:** Proceso mediante el cual el volumen permanece constante.

**POTENCIA:** Cantidad de trabajo efectuado en un tiempo determinado.

**REGENERADOR:** Elemento capaz de acumular los gases de salida de un proceso, el cual a la vez calienta los gases de entrada.

**TEMPERATURA:** Magnitud encargada de medir el calor o nivel térmico al que se encuentra un cuerpo a analizar.

**TRABAJO:** Producto de una fuerza aplicada a un cuerpo o fluido el cual produce un movimiento.

## RESUMEN

El presente trabajo de grado expone una investigación documental de sistemas que comprenden motores Stirling. El documento parte por la justificación la cual es capaz de resolver la problemática de escasez de investigaciones respecto a este tema en Colombia. Posteriormente, se presenta la metodología con la cual se realizaran las investigaciones documentales respecto al tema. Esto con el objetivo de efectuar un completo análisis de las revisiones realizadas y un análisis detallado de los resultados expuestos en la literatura. Se logra evidenciar que al menos el 41% de los investigadores usaron la configuración Beta de motor Stirling, además se presenta la tendencia que alrededor del 22% de los artículos revisados usan Helio como fluido de trabajo. Por último se evidencia la importancia de exponer el potencial del motor Stirling debido a que este puede usar una gran variedad de fuentes de energía como lo puede ser la combustión de biomasa, combustión de GLP, uso de calentadores y la concentración de energía solar en un punto focal.

Palabras Clave: Motor Stirling, Metodología, Uso de energía.

## INTRODUCCIÓN

La tecnología de motores basados en el ciclo Stirling, han estado en crecimiento alrededor del mundo como una de las posibilidades para la transformación de energía térmica en energía mecánica de forma eficiente [1], dado a la variedad de fluidos con los que se puede trabajar y a la amplia diversidad de fuentes de energía térmica como lo pueden ser desde combustibles fósiles como carbón, gas natural, petróleo hasta la energía proveniente del sol, entre otros. También gracias a su categorización de motor de combustión externa permite que el suministro de energía sea independiente del sistema [2]. Razón por la cual es de gran importancia realizar estudios capaces de determinar las mejores formas y disposiciones de los motores Stirling.

De acuerdo a lo anteriormente mencionado, el estudio de los motores Stirling conlleva varias líneas de impacto las cuales se deben solucionar, siendo lo más relevante el estudio de los sistemas que lo comprenden así como los comportamientos físicos y térmicos de los cuales está sujeto este tipo de sistemas [3], al igual que la baja estabilidad de estos motores por causa de las diferentes variables como lo son presiones de trabajo, temperaturas alcanzadas, admisión e intercambios de energía dentro del sistema [4].

Existen múltiples estudios encargados de realizar modelos y simulaciones, sustentadas en las leyes termodinámicas del ciclo Stirling y los diferentes comportamientos mecánicos de los elementos que lo componen, lo que ha generado diferentes conocimientos y desarrollos que permiten afrontar y solucionar el fenómeno de irreversibilidades, el cual es el encargado de manifestarse por medio de los cambios y pérdidas de eficiencia, representados en funcionamientos anómalos de las propiedades del sistema que compone los motores Stirling [4].

Se puede evidenciar de acuerdo con los resultados obtenidos por los autores, que los esfuerzos de varias investigaciones se centran en gran parte a simulaciones basadas en la determinación de modelos capaces de representar

los sistemas de motores Stirling, teniendo como base fundamental la importancia de usar la teoría de Schmitd para determinar la fiabilidad de los modelos y su semejanza con la realidad. Igualmente se evidencia la necesidad por parte de los investigadores de realizar pruebas experimentales para determinar la fiabilidad de sus modelos la cual, es de gran ayuda ya que logran estipular la desviación para cada caso entre la parte teórica y experimental.

El desarrollo del motor Stirling no es lo único que se debe apreciar ya que los elementos a los cuales se les entrega la energía mecánica en forma de potencia, es una parte importante desde donde se podrá dar un uso aprovechable si se transforma en energía eléctrica, de allí que la mayoría de sistemas son acoplados con bobinas generadoras de energía en diferentes configuraciones, llamando la atención sobre todas estas los sistemas DISH-STIRLING, los cuales son sistemas compuestos de concentradores cilindro parabólicos encargados de concentrar la energía en un foco, dando esta, al cilindro caliente el cual transformara la energía mecánica mediante una bobina en energía eléctrica, presentando así una de las opciones más viables e importantes a la hora de los desarrollos correspondientes a los sistemas Stirling.

Este documento proporciona al lector una referencia en los campos más relevantes en diferentes lugares del mundo relacionados con los motores de ciclo Stirling tales como, nuevos diseños, sistemas DISH, nuevos modelos y simulaciones, dando así un conocimiento básico a partir de una revisión detallada de literatura científica de los temas anteriormente mencionados, con el fin de facilitar el estado del arte en este tema y orientar a futuros investigadores para el desarrollo de esta tecnología.

# 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1 PROBLEMÁTICA DE INVESTIGACION EN COLOMBIA

En Colombia a pesar de los adelantos tanto constitucionales como de diferentes instituciones se ha avanzado mucho en el ámbito de investigaciones científicas en cualquier campo, como lo menciona Colciencias en su informe de productos 2009 - 2013, Bogotá cuenta con alrededor de 219 semilleros de investigación relacionados con el área de ingeniería y tecnologías, de allí que se lograron llegar a generar 25.232 productos de investigación, de los cuales solo el 3 %<sup>1</sup> son productos destinados a innovaciones y aproximadamente 20% a generación de nuevo conocimiento, de allí que se puede apreciar que en Colombia y Bogotá específicamente a pesar de la gran cantidad de productos de investigación como lo son prototipos o artículos científicos la gran mayoría solo esta destinados a replicar información proveniente de países desarrollados dando como resultado un aproximado de 142 productos de investigación por año en la capital de la república de Colombia, esto genera un vacío ya que Bogotá es la ciudad con más cantidad de instituciones de educación superior, egresando alrededor de 5768 profesionales relacionados con ingeniería y tecnologías<sup>2</sup>.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, Colombia y en especial Bogotá a pesar de sus adelantos y esfuerzos por incentivar la investigación científica, en relación con los estudiantes que se gradúan es demasiado pequeña, gracias a las otras posibilidades que ofrecen instituciones para culminar su titulación, generando que las investigaciones realizadas en este sector del mundo sean pocas y aumente las brechas científicas que existen entre nuestro país y los países de primer mundo.

---

<sup>1</sup> Documento perfil de la ciencia por departamento , Colciencias, república de Colombia , 2013 [64]

<sup>2</sup> Revista semana, Y donde están los ingenieros, 2014. [65]

## 1.2 SITUACIÓN ACTUAL CON RESPECTO A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES

En la actualidad más del 60% de suministro y generación de energía eléctrica alrededor del mundo, viene de los llamados combustibles fósiles como lo presenta González Santaló José como se presenta en la Figura 1, en la cual muestra que los combustibles generalmente usados son, petróleo, carbón y gas natural, siendo así el estado de las fuentes de energía desde hace más de dos siglos, por consiguiente la economía de algunos países como lo es la de Colombia, tienen como fuente importante de ingresos la extracción de materias primas fósiles del suelo de dichas naciones.

El petróleo mundialmente ofrece el 3.4 %<sup>3</sup> de generación de energía eléctrica, siendo así el combustible más explotado y común, en el caso de los motores de combustión interna estáticos desde hace más de 100 años se tiene como fuente de energía principal este tipo de combustibles como lo son diésel y gasolina los cuales generan problemáticas como:

- Problemáticas ambientales
- Dependencia de las economías de estos combustibles
- El posible agotamiento de combustibles

De acuerdo a la problemática ambiental y cambio climático se tiene que la quema y uso de este tipo de combustibles genera gases nocivos para la atmósfera y para la misma población humana como lo son Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), gases de Metano (CH<sub>4</sub>), Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>), Monóxido de Carbono (CO), compuestos derivados del Metano y emisiones de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), estos gases son los causantes del llamado efecto invernadero, la apertura de la capa de ozono y por último enfermedades respiratorias en la población, como lo es el caso del Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O)<sup>4</sup>.

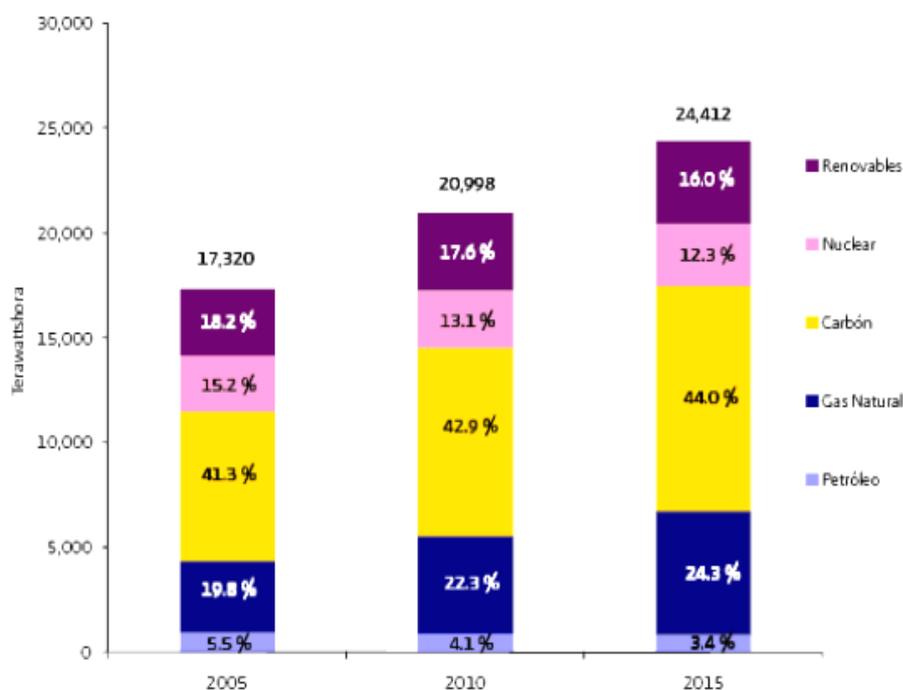
---

<sup>3</sup> Quemada Marín José (et. at.), El futuro de los combustibles fósiles, UNED [69].

<sup>4</sup> G.C.E Group, Manual del sector de la energía Quema de Combustibles, 2012 [5].

Figura 1 - Generación de energía a partir de combustibles mundialmente

**Combustibles y fuentes de energía para la generación eléctrica mundial, 2005-2015**  
(TWh)



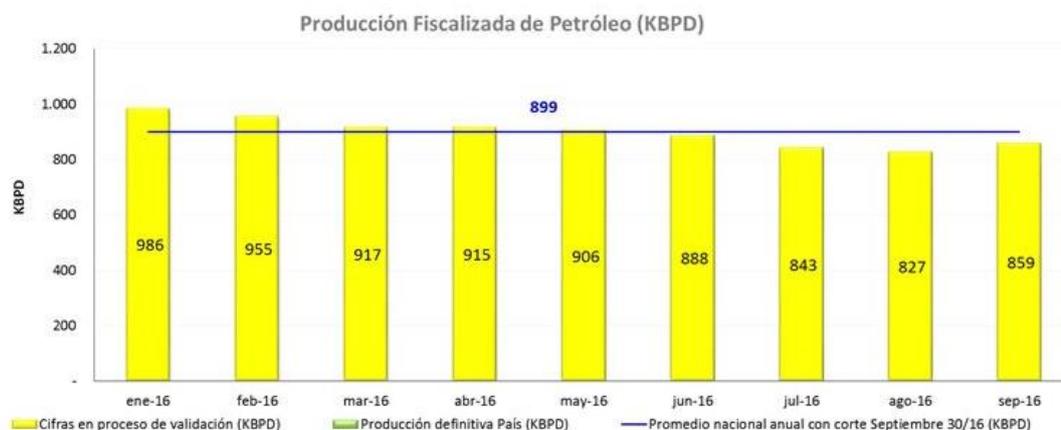
Fuente - Quemada Marin Jose [69].

En la segunda problemática se presenta la generación de petróleo en Colombia y por consiguiente su dependencia económica a la extracción de combustibles fósiles del suelo, como lo presenta la autoridad nacional de hidrocarburos (ANH) donde en lo recorrido hasta el mes de septiembre de 2016 se generaron en promedio 899.000 barriles promedio por día (KBPD), como se muestra en la Figura 2.

Por otro lado se tiene que las cifras de regalías giradas a departamentos como la Guajira comenzó en \$ 7.683'302.360 hacia el año 1994 y diez años después recibe la cantidad de \$ 10'566.799.063<sup>5</sup>, lo que deja visto que en Colombia en departamentos como la Guajira su economía en gran parte depende de las regalías recibidas por la explotación del petróleo como lo presentó Ecopetrol en su registro de regalías.

<sup>5</sup> Ecopetrol, histórico de regalías 1994 - 2003. [6]

Figura 2- Producción fiscalizada de petróleo promedio de 2016



Fuente - Ecopetrol [6]

La tercera problemática reside en la futura escases y agotamiento de las reservas de petróleo y gas disponibles en Colombia, como lo muestra en el informe dado por la agencia nacional de hidrocarburos (ANH) de la república de Colombia, nos muestra el aumento de la producción de petróleo y gas natural en las Figuras 3 y 4, generando así un descenso en el tiempo que duraran las reservas para la auto sustentación en Colombia, ya que al cierre de corte llevado a cabo el 31 de diciembre de 2016 se estima que Colombia cuenta con una reserva sustentable de 5,5 años de petróleo y 13 años de gas natural<sup>6</sup>. Dado a la veracidad de la disminución drástica y futura escases de los combustibles más importantes, se genera la necesidad en Colombia de desarrollar nuevas alternativas de energía como las renovables y no convencionales que logren reemplazar los combustibles fósiles.

### 1.3 POSIBLE SITUACIÓN IDEAL PARA LA PROBLEMÁTICA POR COMBUSTIBLES FÓSILES

En la actualidad el 13% de la energía alrededor del mundo viene de fuentes renovables no contaminantes como lo puede ser energía eólica, solar y

<sup>6</sup> Autoridad Nacional de Hidrocarburos, información histórico de reservas, 2000 - 2015 [7]

demás<sup>7</sup>. Sin embargo, el impacto ambiental es cada vez más perceptible gracias al uso de combustibles fósiles los cuales generan gases contaminantes que impactan en la atmósfera.

Figura 3- historial de reservas de petróleo de Colombia

| AÑO  | CRUDO @ 31.DIC               |           |                             |                          |                                    | Reemplazo Reservas (r+ni) / P | R/P (Años) |
|------|------------------------------|-----------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------|
|      | Reservas Probadas (R) (MBIs) | Variación | Producción Anual (P) (MBIs) | Revaluaciones (r) (MBIs) | Nuevas Incorporaciones (ni) (MBIs) |                               |            |
| 2000 | 1.972                        |           | 251                         | -68                      |                                    | (0,27)                        | 7,9        |
| 2001 | 1.842                        | -6,6%     | 221                         | 91                       |                                    | 0,41                          | 8,4        |
| 2002 | 1.632                        | -11,4%    | 211                         | 1                        |                                    | 0,00                          | 7,7        |
| 2003 | 1.542                        | -5,5%     | 198                         | 108                      |                                    | 0,54                          | 7,8        |
| 2004 | 1.478                        | -4,2%     | 193                         | 128                      |                                    | 0,67                          | 7,7        |
| 2005 | 1.453                        | -1,7%     | 192                         | 167                      |                                    | 0,87                          | 7,6        |
| 2006 | 1.510                        | 3,9%      | 193                         | 250                      |                                    | 1,29                          | 7,8        |
| 2007 | 1.358                        | -10,0%    | 194                         | 42                       |                                    | 0,22                          | 7,0        |
| 2008 | 1.668                        | 22,8%     | 215                         | 524                      |                                    | 2,44                          | 7,8        |
| 2009 | 1.988                        | 19,2%     | 245                         | 565                      |                                    | 2,31                          | 8,1        |
| 2010 | 2.058                        | 3,5%      | 287                         | 357                      |                                    | 1,24                          | 7,2        |
| 2011 | 2.259                        | 9,8%      | 334                         | 535                      |                                    | 1,60                          | 6,8        |
| 2012 | 2.377                        | 5,2%      | 346                         | 464                      |                                    | 1,34                          | 6,9        |
| 2013 | 2.445                        | 2,8%      | 368                         | 268                      | 168                                | 1,18                          | 6,6        |
| 2014 | 2.308                        | -5,6%     | 361                         | 192                      | 14                                 | 0,57                          | 6,4        |
| 2015 | 2.002                        | -13,3%    | 367                         | -39                      | 87                                 | 0,13                          | 5,5        |

Fuente - Autoridad Nacional de Hidrocarburos [7]

Figura 4- historial de reservas de gas natural de Colombia

| AÑO  | GAS @ 31.DIC                |                        |           |                            |                               | Reemplazo Reservas I / P | R/P (Años) | R' / P (Años) |
|------|-----------------------------|------------------------|-----------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------|---------------|
|      | Reservas Probadas (R) (Gpc) | Reservas 3P (R') (Gpc) | Variación | Producción Anual (P) (Gpc) | Incorporación Anual (I) (Gpc) |                          |            |               |
| 2000 |                             | 6.188                  |           | 210                        | -243                          | (1,16)                   |            | 29,5          |
| 2001 |                             | 7.489                  | 21,0%     | 218                        | 1.519                         | 6,97                     |            | 34,4          |
| 2002 |                             | 7.187                  | -4,0%     | 220                        | -82                           | (0,37)                   |            | 32,7          |
| 2003 |                             | 6.688                  | -6,9%     | 211                        | -288                          | (1,36)                   |            | 31,7          |
| 2004 |                             | 7.212                  | 7,8%      | 224                        | 748                           | 3,34                     |            | 32,1          |
| 2005 |                             | 7.527                  | 4,4%      | 236                        | 552                           | 2,33                     |            | 31,8          |
| 2006 | 4.342                       | 7.349                  | -2,4%     | 248                        | 70                            | 0,28                     |            | 29,6          |
| 2007 | 3.746                       | 7.084                  | -3,6%     | 266                        | 2                             | 0,01                     |            | 26,6          |
| 2008 | 4.384                       | 7.277                  | 2,7%      | 319                        | 512                           | 1,60                     |            | 22,8          |
| 2009 | 4.737                       | 8.460                  | 16,3%     | 371                        | 1.554                         | 4,19                     |            | 22,8          |
| 2010 | 5.405                       | 7.058                  | -16,6%    | 398                        | -1.004                        | (2,52)                   |            | 17,7          |
| 2011 | 5.463                       | 6.630                  | -6,1%     | 387                        | -41                           | (0,11)                   |            | 17,1          |
| 2012 | 5.727                       | 7.008                  | 5,7%      | 423                        | 801                           | 1,89                     |            | 16,6          |
| 2013 | 5.508                       | 6.409                  | -8,5%     | 458                        | 239                           | 0,52                     | 12,0       | 14,0          |
| 2014 | 4.759                       | 5.915                  | -7,7%     | 453                        | -296                          | (0,65)                   | 10,5       | 13,1          |
| 2015 | 4.361                       | 5.443                  | -8,0%     | 419                        | 15                            | 0,04                     | 10,4       | 13,0          |

Fuente - Autoridad Nacional de Hidrocarburos [7]

<sup>7</sup> Quemada Marín José (et. at.), El futuro de los combustibles fósiles, UNED [69].

Países como Colombia han generado leyes como la 1715<sup>8</sup>, la cual se expidió el 13 de mayo del 2014, donde estimula a la población al uso de energías renovables y no convencionales y estrategias que se presentan en el plan energético nacional (PEN), donde se proponen a 2015 dar un mejor uso a los combustibles fósiles, por lo tanto se generaron opciones para en un futuro no muy lejano en Colombia disminuir el uso de combustibles fósiles y reemplazarlos por sistemas menos contaminantes y amigables con el ambiente.

En la siguiente situación ideal se contemplan sistemas que no dependan o no utilicen los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, siendo así una respuesta directa a los impactos de la demanda mundial y a la futura escasez de este producto, de acuerdo a esto la situación ideal de Colombia en los próximos años se dará cuando se empiecen a reemplazar los sistemas dependientes de combustibles fósiles por sistemas que operan con fuentes alternas, aprovechando los recursos hídricos, eólicos y solares de los que goza el país.

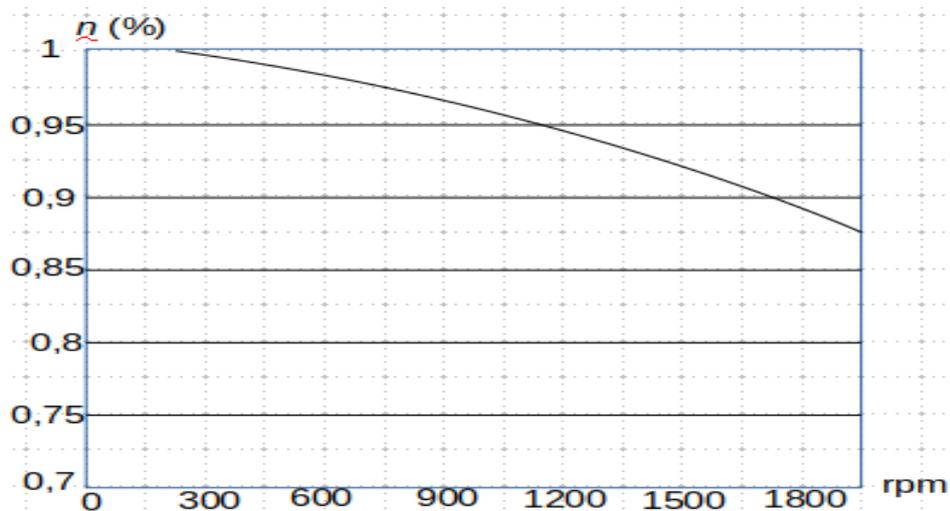
De acuerdo a lo anterior gracias a las legislaciones existentes y al contexto geográfico de Colombia, la situación ideal desarrollada se contemplaría en un aprovechamiento de fuentes no convencionales como el GLP, uso de biomasa desechada en procesos agrícolas y el uso de la energía solar incidente sobre una región colombiana específica, para transformarla en energía eléctrica por medio del uso de un motor Stirling, el cual es capaz de utilizar la energía térmica en su funcionamiento logrando eficiencias relacionadas con las revoluciones entregadas como lo presenta González<sup>9</sup> en su documento donde se representado en la Figura 5, eficiencias superiores al 80% en un motor Stirling bajo una temperatura de foco caliente de alrededor de 700 K y una temperatura fría de 300 K en función de las revoluciones de trabajo [8].

---

<sup>8</sup> Congreso de la República de Colombia, Ley 1715. 2014 [66]

<sup>9</sup> González Bayón Juan José et, al. Análisis de irreversibilidades en el comportamiento de un motor Stirling. 2011 [8]

Figura 5- Eficiencia de motor Stirling con respecto a revoluciones entregadas



Fuente - González Bayón Juan José et, al [8]

De acuerdo a lo anterior una situación ideal reside en donde se utilice un motor Stirling que funcione con fuentes de energía no convencionales como la biomasa, GLP y energía solar, el cual sea capaz de entregar su potencia a una bobina o generador, se considera válida para una fuente de generación alternativa de energía eléctrica que no dependa de combustibles fósiles convencionales.

#### 1.4 PUNTOS DE CONFLICTO DE SITUACIÓN IDEAL Y LA PROBLEMÁTICA POR COMBUSTIBLES FÓSILES

En lo contemplado, en la situación real se puede apreciar claramente la dependencia del mundo, de la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles como es normalmente evidenciado; para llegar a la situación ideal se puede contemplar aprovechar las fuentes de energía no convencionales mencionadas, mediante un sistema de motor Stirling y bobina productora de energía eléctrica, no obstante, se tiene como impedimento el hecho de que no existen estudios claros en Colombia donde se logre demostrar la eficiencia de dicho sistema en el país.

Por otro lado se genera la necesidad de realizar estudios que verifiquen cuál es el sistema más óptimo para la utilización de la energía térmica proveniente de

fuentes no convencionales, lo que conlleva al análisis de la forma de energía que es mejor usar, comprendiendo las siguientes opciones generales:

- El uso de energía solar dirigida por concentradores a un punto focal donde sea capaz de elevar la temperatura del cilindro caliente del motor en cuestión.
- El uso de la combustión de Biomasa o GLP donde se aprovechen los gases producidos por parte del cilindro caliente del sistema

De acuerdo a lo anterior se tiene que la barrera a superar es la dependencia de Colombia de los combustibles fósiles convencionales, a la generación de energía eléctrica por medio de fuentes alternas y no convencionales, es la poca existencia de estudios que logren validar que este sistema es válido y aplicable en Colombia, dando así un hueco de desconocimiento de dichas fuentes capaces de generar energía más limpiamente y dar una pauta para solucionar las problemáticas de dependencia y contaminación generadas por los combustibles fósiles.

## 2 JUSTIFICACIÓN

Teniendo presente que en la actualidad lo más importante es el progreso de un país o de una empresa, se tiene el uso eficiente de la energía como lo más importante a considerar, ya que la energía suministrada ya sea por medio de un combustible fósil, renovable o cualquier otro, genera un costo que se tiene que retornar en cuanto sea posible, de acuerdo a esto en la actualidad la industria ha diseñado sistemas más económicos y eficientes que corresponden tanto al impacto energético como ambiental generado por un incorrecto uso de los combustibles.

Colombia es un país en crecimiento y no está exento de la importancia de la energía por parte de la industria y el país entero, donde la eficiencia de un sistema es la que determina que cantidad de energía es la que se está aprovechando, de allí que se propone el estudio de un motor alternativo llamado Stirling, basado en principios de combustión externa, el cual posee el potencial de generar energía de forma alternativa; por lo cual con esta investigación se podrán apreciar el estado actual y lo que se espera en el futuro relacionado con dichos motores.

Los motores Stirling gracias a su funcionamiento basado en ciclos cerrados y combustión externa permiten que su fluido de trabajo pueda cambiar dependiendo a las propiedades con las que cuente, igualmente la admisión de energía térmica por parte de su llamado cilindro caliente permite utilizar dicha propiedad de cualquier tipo de combustible, lo que permite una amplia gama de combustibles a probar como lo pueden ser los combustibles fósiles convencionales o no convencionales, la biomasa o incluso formas de energía térmica como lo es la solar, dando así un posible espacio para transformar un motor Stirling en un tipo de motor ecológico.

El interés investigativo se centra en determinar el estado del arte actual de estudios realizados en las aplicaciones y simulaciones en motores Stirling, el cual servirá de guía a futuras investigaciones para el desarrollo de este tipo de tecnología.

La adquisición del estado de desarrollo en cuanto a motores Stirling, se centra en identificar los vacíos tanto teóricos, prácticos y científicos que se relacionan con este tema, para poder solucionarlos en futuros proyectos. Por lo tanto una revisión de estado del arte tanto regional como a nivel mundial se vuelve de gran importancia para poder realizar nuevos avances en energía alternas, ya que teniendo conocimiento del estado actual y vacíos existentes respecto a este tema de investigación se tendrá completo control de los aspectos a los cuales se debe incursionar para solucionar esos vacíos en la investigación.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar una investigación documental, del estado del arte de sistemas que comprendan motores Stirling para ser usados en la transformación de energía térmica a eléctrica o mecánica, enfocadas en simulaciones y aplicaciones.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Conocer y comprender los documentos científicos de acuerdo a su estado y tipo de impacto.
- Analizar de manera detallada la información obtenida en la literatura.
- Evaluar la información recopilada.
- Escribir un artículo de revisión de motores Stirling conforme los parámetros descritos por una revista científica.

## 4 MARCO REFERENCIAL

### 4.1 MARCO HISTORICO

En el año 1699 ocurre una primera aparición del ciclo Stirling sin ser patentado el cual se usa en un rudimentario artefacto el cual era capaz de aprovechar la expansión del aire para hacer girar un volante, este artefacto es realizado en Francia [9]. Siglos después, en el año de 1816 el ciclo Stirling realiza su aparición gracias a un fraile escocés llamado Robert Stirling, la patente se le da en el reino unido y se nombra como ciclo Stirling en honor a su creador [9]. La idea nace de considerar que el funcionamiento de una máquina de vapor es muy complicado y en la época podía llegar a ser peligroso ya que en esta época no se tenían tantos materiales como los que se tienen en la actualidad [10]. Por estas razones Robert Stirling plantea un ciclo el cual es capaz de realizar el mismo proceso de calentar y enfriar un gas con la diferencia de que esto se realice en el interior del motor propuesto [9].

Años más tarde en el periodo comprendido entre 1824 y 1840 el fraile Robert Stirling trabaja de la mano con su hermano James Stirling para realizar algunas mejoras del motor ya propuesto, la reforma principal en el ciclo original se encuentra en el uso de un nivel de presión el cual es capaz de incrementar de forma considerable la eficiencia del motor [10].

En 1843 los hermanos Stirling continúan sus investigaciones y en este año son capaces de convertir una máquina de vapor del ciclo de Carnot aplicado a que funcione con el ciclo Stirling. [11], la cual era capaz de consumir menos carbón ya que operaba como un motor de aire. Esta máquina modificada tuvo una potencia de salida de 37 caballos de fuerza donde se tenía una presión interna variable de entre 160 a 240 psi [9].

En el año 1853 el ingeniero sueco John Ericsson realiza la construcción de un motor Stirling bastante grande, el cual tenía unas dimensiones de 4,2 m de diámetro con una carrera de 1,5 m. Pocos años después alrededor de 1870 se

logra adaptar por primera vez un motor Stirling para que funcione con energía solar [12]. Sin embargo, en 1890 este revolucionario sistema pierde fuerza por la llegada de motores de combustión interna y las primeras apariciones de los motores eléctricos. No obstante en el año 1908 T. reader y C. Hooper realizan la construcción de un motor Stirling accionado con energía solar y fue usado para el bombeo de agua.

En 1930 la reconocida compañía Phillips pide a unos de sus ingenieros realizar un sistema que permitiera la creación de generadores de baja potencia, donde estos tras algunos estudios encuentran que el motor Stirling es una gran alternativa por ser silencioso lo que hace que las interferencias con ondas radiales sean muy mínimas, estas características son capaces de cumplir con los requerimientos realizados por la compañía a sus ingenieros [9].

En la década de los 60's es donde se tiene quizás el desarrollo más grande del motor Stirling al ser usados por la NASA, la cual lo usa para hacer mover vehículos pequeños de reconocimiento [10]. En la década de los 70's el motor Stirling tiene un cambio completo al ser usado de forma inversa es decir aplicando el ciclo inverso el cual sirve para alcanzar temperaturas bajas estos sistemas son aplicados para la licuefacción de gases [13].

En los 80's la agencia americana para el desarrollo internacional realiza una financiación e inversión para el desarrollo de un motor Stirling de bajo costo el cual sería aplicado para países en desarrollo, se desarrolla el diseño y construcción de un motor Stirling y puesto en marcha en Bangladesh como prueba de la viabilidad de los prototipos [13].

Desde estos años hasta la actualidad los investigadores centran la atención en este tipo de motores debido a la versatilidad que poseen a la hora de tener diferentes tipos fuentes de generación de potencia del motor; y debido a esto los estudios de estos sistemas está en crecimiento y en considerable aumento.

## 4.2 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

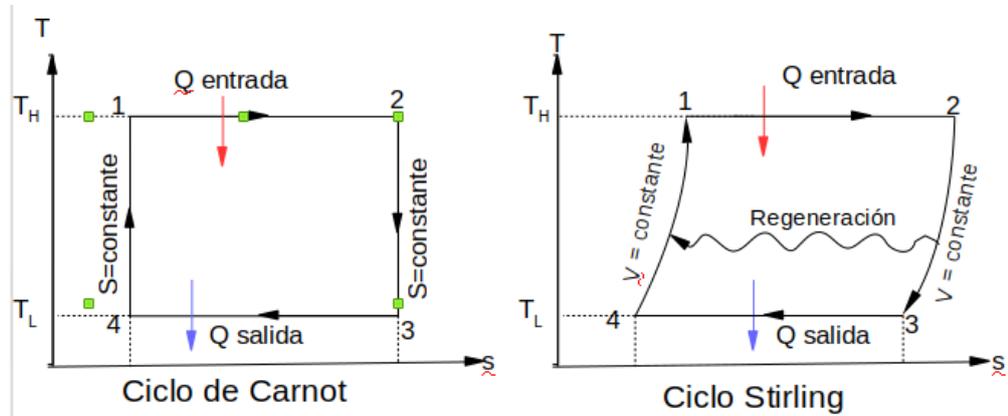
Teniendo en cuenta que el ciclo más conocido en la ingeniería y el de más importancia es el que se denomina CARNOT, gracias a su invención por parte del físico francés Sadi Carnot, se tiene que es el ciclo termodinámico ideal más simple y eficiente siendo compuesto por 4 procesos totalmente reversibles, los cuales son [14]:

- Adición de calor isotérmica
- Expansión isentrópica
- Rechazo de calor isotérmico
- Compresión isentrópica

Teniendo en cuenta que el ciclo de Carnot es el ciclo ideal (reversible) con más importancia en el desarrollo de máquinas térmicas, el cual posee eficiencias mayores a otros ciclos para el mismo rango de temperaturas, se establece que este es el que se toma como referencia para los demás ciclos termodinámicos.

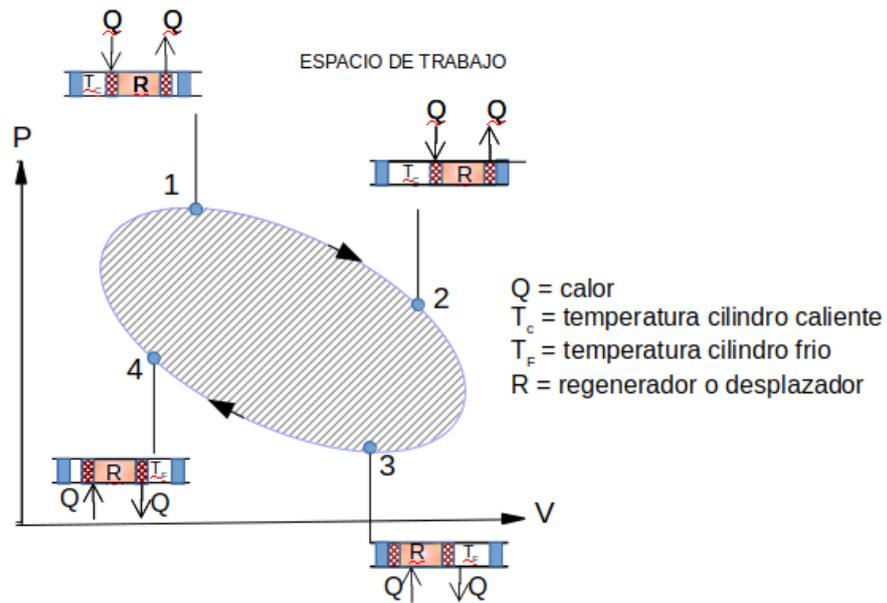
Partiendo de lo anteriormente descrito se tendrá la concepción de ciclo Stirling como un ciclo derivado del de Carnot pero igualmente ideal, por lo tanto la diferencia entre el ciclo Stirling y el de Carnot radica en la sustitución de los procesos isentrópicos por procesos regenerativos a volumen constante, debido a esto se debe disponer en los sistemas de ciclo Stirling un elemento denominado regenerador donde allí se almacena una parte de la energía y se entrega de nuevo al fluido de trabajo cuando comienza de nuevo el ciclo [15]. Teniendo así los diagramas T-S y P-V de ciclo mostrados a continuación:

Figura 6 - Diagramas T-S de los ciclos Carnot y Stirling-



Fuente- Termodinámica Yanus A. Cengel; Michael Boles [16]

Figura 7 Posición del cilindro a lo largo del ciclo



Fuente - Martini, Stirling engine design manual [17]

El ciclo Stirling está compuesto por los siguientes procesos termodinámicos evidenciados en la Figura 6 y por consiguiente la posición de los cilindros para cada estado en la Figura 7, teniendo así que los procesos con los cuales funciona el ciclo serán:

- 1-2: expansión a temperatura constante y aquí se presenta un ingreso de calor de una fuente externa
- 2-3: regeneración a volumen constante de allí se transfiere el calor no utilizado del fluido de trabajo al regenerador
- 3-4: compresión a temperatura constante donde se presenta una salida de calor al sumidero
- 4-1: regeneración a volumen constante donde se transfiere calor desde el regenerador al fluido de trabajo

De acuerdo a lo anterior se debe tener en cuenta la importancia del regenerador el cual debe ser de un material de un alto coeficiente de calor específico, para el almacenamiento temporal de energía, de allí que existan distintos tipos de este sistema así como configuraciones de las maquinas térmicas que trabajan bajo el ciclo Stirling.

Dado que se considera este ciclo como totalmente reversible se puede asumir que de forma ideal tendrá la misma eficiencia térmica que el ciclo de Carnot en un rango de temperaturas establecido, lastimosamente al ser sistemas ideales son demasiado difíciles de aplicar, ya que en la realidad no hay materiales con eficiencias de 100 por ciento, y presenta perdidas por distintos factores como lo son fricción, perdidas de calor con el ambiente, e incluso perdidas por irreversibilidades.

Gracias al comportamiento de ciclo cerrado y que los motores Stirling pueden trabajar con diferentes fluidos tales como Helio y Aire se puede realizar la aproximación para un estudio teórico descrito bajo la ecuación de estado de gas ideal (1), con la cual se pueden determinar las propiedades del fluido en cada estado, teniendo así:

$$PV = mR_gT \quad (1)$$

Donde se tiene que P será la presión presente dentro del cilindro, V el volumen que posee, m la masa del fluido presente dentro del ciclo,  $R_g$  la constante del

gas ideal en cuestión y T la temperatura del gas en dicho proceso, de acuerdo a esto se podrá determinar las propiedades en los procesos.

Otra de las ecuaciones a tener en cuenta es aquella con la cual se permite calcular el trabajo efectuado (2), esta comprende que el trabajo se obtiene con la integral de la presión en variación del volumen donde en combinación con la ecuación de gases ideales se tendrá:

$$Q = W = mR_g T \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) [kJ] \quad (2)$$

Donde solo se podrá utilizar la ecuación de determinación de trabajo a los estados de 3 a 4 y de 1 a 2 (isotérmicos), como se muestra en la figura 6, gracias en que en dichos procesos se considera que se efectúan ganancias o pérdidas de calor y por consiguiente una variación de los volúmenes contenidos para cada estado.

Otra de las ecuaciones a tener en cuenta es el cambio de la energía interna donde se contempla la ecuación (3), teniendo en cuenta que se considera el Cv calor específico del fluido de trabajo a volumen constante y la diferencia de temperaturas entre los estados a analizar donde para procesos isotérmicos no se contemplaran variaciones de energía interna.

$$Q = \Delta U = m c_v (T_2 - T_1) [kJ] \quad (3)$$

A partir de tener las condiciones de trabajo se podrá determinar la eficiencia ideal del ciclo partiendo de la definición de eficiencia de Carnot (4), la cual se realiza para las diferentes maquinas térmicas, que presenten una fuente de calor y un sumidero.

$$n_{ter} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (4)$$

### 4.3 MARCO NORMATIVO

- En Colombia se cuenta con aspectos jurídicos ambientales para proyectos de generación de energía en Colombia la cual determina la normatividad aplicable a dichos proyectos, hay normas específicas cuando se trata de hidroeléctricas, termoeléctricas u otros medios de generación de energía. En cada caso particular la autoridad competente dicta las normas aplicables.

Licenciamiento ambiental

*Tabla 1 - Condensación de leyes*

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| <b>Ley 99 de 1993</b>           | Crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables y se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA. |
| <b>Decreto 1220 de 2005</b>     | Reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.   |
| <b>Decreto 500 de 2006</b>      | Modifica el Decreto 1220 del 21 de abril de 2005 reglamentario del Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales, en lo relativo al régimen de transición - Planes de Manejo Ambiental.                |
| <b>Decreto ley 2811 de 1978</b> | Código Nacional de Recursos Naturales (vigente parcialmente).   |

Fuente - Elaboración propia<sup>10</sup>

Recurso Aire

*Tabla 2 - Condensación de leyes parte 2*

|                           |   |
|---------------------------|---|
| <b>Decreto 02 de 1982</b> | Reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979 y el Decreto Ley 2811 de 1974, en cuanto a emisiones atmosféricas. Se encuentra en curso proyecto de modificación de esta norma que será |
|---------------------------|---|

<sup>10</sup>Tabla de elaboración propia con base en la Comisión de regulación de energía y gas Colombia [62]

|                               |  |
|-------------------------------|--|
|                               | expedido en el corto plazo.  |
| <b>Decreto 948 de 1995</b>    | Por el cual se reglamentan, parcialmente la Ley 23 de 1973, el Decreto Ley 2811 de 1974, la Ley 9ª de 1979 y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire |
| <b>Resolución 601 de 2006</b> | Establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.   |
| <b>Resolución 627 de 2006</b> | Establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental.   |
| <b>Resolución de 898 1995</b> | Por la cual se regulan los criterios ambientales de calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos y caldera de uso comercial e industrial y en motores de combustión interna de vehículos automotores.                   |

Fuente - Elaboración propia<sup>11</sup>

En el caso de proyectos sean termoeléctricas, el plan de manejo del estado de impacto ambiental debe hacer énfasis en lo relacionado con la contaminación por emisiones atmosféricas que son de gran impacto en estos proyectos. <sup>12</sup>

En Colombia se cuenta con la ley 29 de 1990 la cual fomenta la investigación científica y el desarrollo tecnológico. El congreso de Colombia decreta:

*Tabla 3 - Condensación de leyes parte 3*

|                    |  |
|--------------------|--|
| <b>ARTICULO 1º</b> | Corresponde al Estado promover y orientar el adelanto científico y tecnológico y, por lo mismo, está obligado a incorporar la ciencia y la tecnología a los planes y programas de desarrollo económico y social del país y a formular planes de ciencia y tecnología tanto para el |
|--------------------|--|

<sup>11</sup> Tabla de elaboración propia con base en la Comisión de regulación de energía y gas Colombia [62]

<sup>12</sup> Tabla de elaboración propia con base en la Comisión de regulación de energía y gas Colombia [62]

|                           |  |
|---------------------------|--|
|                           | <p>mediano como para el largo plazo. Así mismo, deberá establecer los mecanismos de relación entre sus actividades de desarrollo científico y tecnológico y las que, en los mismos campos, adelanten la universidad, la comunidad científica y el sector privado colombianos.</p>  |
| <p><b>ARTICULO 2º</b></p> | <p>La acción del Estado en esta materia se dirigirá a crear condiciones favorables para la generación de conocimiento científico y tecnología nacionales; a estimular la capacidad innovadora del sector productivo; a orientar la importación selectiva de tecnología aplicable a la producción nacional; a fortalecer los servicios de apoyo a la investigación científica y al desarrollo tecnológico; a organizar un sistema nacional de información científica y tecnológica; a consolidar el sistema institucional respectivo y, en general, a dar incentivos a la creatividad, aprovechando sus producciones en el mejoramiento de la vida y la cultura del pueblo.</p> |
| <p><b>ARTICULO 3º</b></p> | <p>El Ministerio de Hacienda y Crédito Público incluirá en el proyecto de ley anual de presupuesto las sumas necesarias para financiar el pago de los impuestos de importaciones y de ventas que se liquiden a cargo de las universidades estatales, cuando correspondan a importación de bienes y equipos destinados a actividades científicas y tecnológicas, previa evaluación del proyecto de investigación y de la necesidad de la importación respectiva, hecha por el Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales "Francisco José de Caldas", Colciencias.</p>   |
| <p><b>ARTICULO 4º</b></p> | <p>El Consejo Nacional de Política Económica y Social determinará, en cada vigencia fiscal, a propuesta del Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales "Francisco José de Caldas" Colciencias, las entidades descentralizadas que deberán destinar recursos y su cuantía, para actividades de investigación y desarrollo tecnológico. (Las inversiones a que se refiere este artículo se administrarán mediante contratos inter-administrativos con dicho fondo)</p>   |

|                    |  |
|--------------------|--|
| <b>ARTICULO 5º</b> | En todos los contratos que celebre la administración pública con personas naturales o compañías extranjeras se estipularán los medios conducentes a la transferencia de la tecnología correspondiente.   |
| <b>ARTICULO 6º</b> | El otorgamiento de exenciones, descuentos tributarios y demás ventajas de orden fiscal reconocidos por la ley para fomentar las actividades científicas y tecnológicas, requerirá la calificación previa favorable hecha por el Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales "Francisco José de Caldas", Colciencias, y deberá sujetarse a la celebración de contratos que permitan a esta entidad verificar los resultados de las correspondientes investigaciones. |
| <b>ARTICULO 7º</b> | La inclusión de apropiaciones presupuestarias para planes y programas de desarrollo científico y tecnológico, por parte de establecimientos públicos del orden nacional, se hará en consulta con el Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales "Francisco José de Caldas", Colciencias, con el fin de racionalizar el gasto público destinado a este efecto.   |

Fuente - Elaboración propia<sup>13</sup>

*Tabla 4 - Condensación de leyes parte 4*

|                    |  |
|--------------------|--|
| <b>ARTICULO 8º</b> | Autorízase al Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales "Francisco José de Caldas", Colciencias, para proponer al Gobierno, el cual dictará la correspondiente reglamentación, el otorgamiento de premios y distinciones a las instituciones e investigaciones sobresalientes, así como para conceder apoyos que faciliten a los investigadores profesionales su trabajo. |
|--------------------|--|

<sup>13</sup> Tabla de elaboración propia basada en la Secretaria General de la alcaldía de Bogotá D.C [63]

|                     |  |
|---------------------|--|
| <b>ARTICULO 9º</b>  | El Gobierno reglamentará la forma como las representaciones diplomáticas y consulares de Colombia en el exterior contribuirán a la actualización de metodologías y técnicas de la investigación científica y tecnológica y a la incorporación del país al contexto científico y tecnológico mundial. |
| <b>ARTICULO 10º</b> | El Gobierno asignará los espacios permanentes en los medios de comunicación de masas de propiedad del Estado para la divulgación científica y tecnológica.   |

Fuente - Elaboración propia<sup>14</sup>

**ARTICULO 11º:** De conformidad con el ordinal 12 del artículo 76 de la Constitución, revístese al Gobierno, por el término de un año contado a partir de la sanción de la presente Ley, de facultades extraordinarias para:

- Modificar los estatutos de las entidades oficiales que cumplen funciones de ciencia y tecnología, incluyendo las de variar sus adscripciones y vinculaciones y las de crear los entes que sean necesarios.
- Dictar las normas a que deban sujetarse la Nación y sus entidades descentralizadas para asociarse con los particulares en actividades científicas y tecnológicas, proyectos de investigación y creación de tecnologías.
- Reglamentar los viajes de estudio al exterior de los investigadores nacionales ofreciéndoles las ventajas y facilidades que les permita su mejor aprovechamiento.
- Regular las modalidades específicas de contratos de fomento de actividades científicas y tecnológicas.<sup>15</sup>

<sup>14</sup> Tabla de elaboración propia basada en la Secretaria General de la alcaldía de Bogotá D.C [63]

<sup>15</sup> Tabla de elaboración propia basada en la Secretaria General de la alcaldía de Bogotá D.C [63]

## 5 METODOLOGÍA

Para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos, bajo el cronograma propuesto, se planteó el diagrama de proceso presente en la Figura 8, con el cual se procedió a la realización y cumplimiento de los objetivos donde se utilizaron bases de datos científicas en las cuales se pudo realizar una revisión del estado del arte y del estado en el cual se encuentra las investigaciones realizadas en Colombia y el mundo, teniendo de igual forma los siguientes parámetros de estudio para la selección de los artículos a estudiar:

- Artículos los cuales fueran elaborados en un periodo anterior no mayor a 10 años
- Presentación de variables de la investigación como lo son temperaturas, presión, fluido de trabajo, revoluciones.
- Presentación de manera concisa los resultados obtenidos en los motores Stirling en términos de potencia entregada y eficiencias del sistema
- Aquellas investigaciones que presentaran estudios comprensibles para la formación en pregrado de ingeniería mecánica.

La clasificación de los artículos científicos se realizó de acuerdo a su estado y tipo de impacto, por lo que se consideró conforme a una primera inmersión de revisiones en motores Stirling, la clasificación según las siguientes características:

1. Modelos e Irreversibilidades
2. Nivel Colombia y Latinoamérica
3. Aplicaciones de Motores Stirling
4. Simulaciones
5. Investigaciones de motores Stirling que trabajen con energía solar como fuente de energía.

De acuerdo a los criterios de clasificación se puede considerar el diagrama de proceso en la figura 8, donde se puede evidenciar los pasos a tener en cuenta para la apreciación de cada uno de los artículos analizados presentes en el

resultado final. Al finalizar las revisiones se pudo establecer una base de datos para categorizar la revisión, la cual se presenta en la Tabla 5.

*Tabla 5 - Clasificación de artículos*

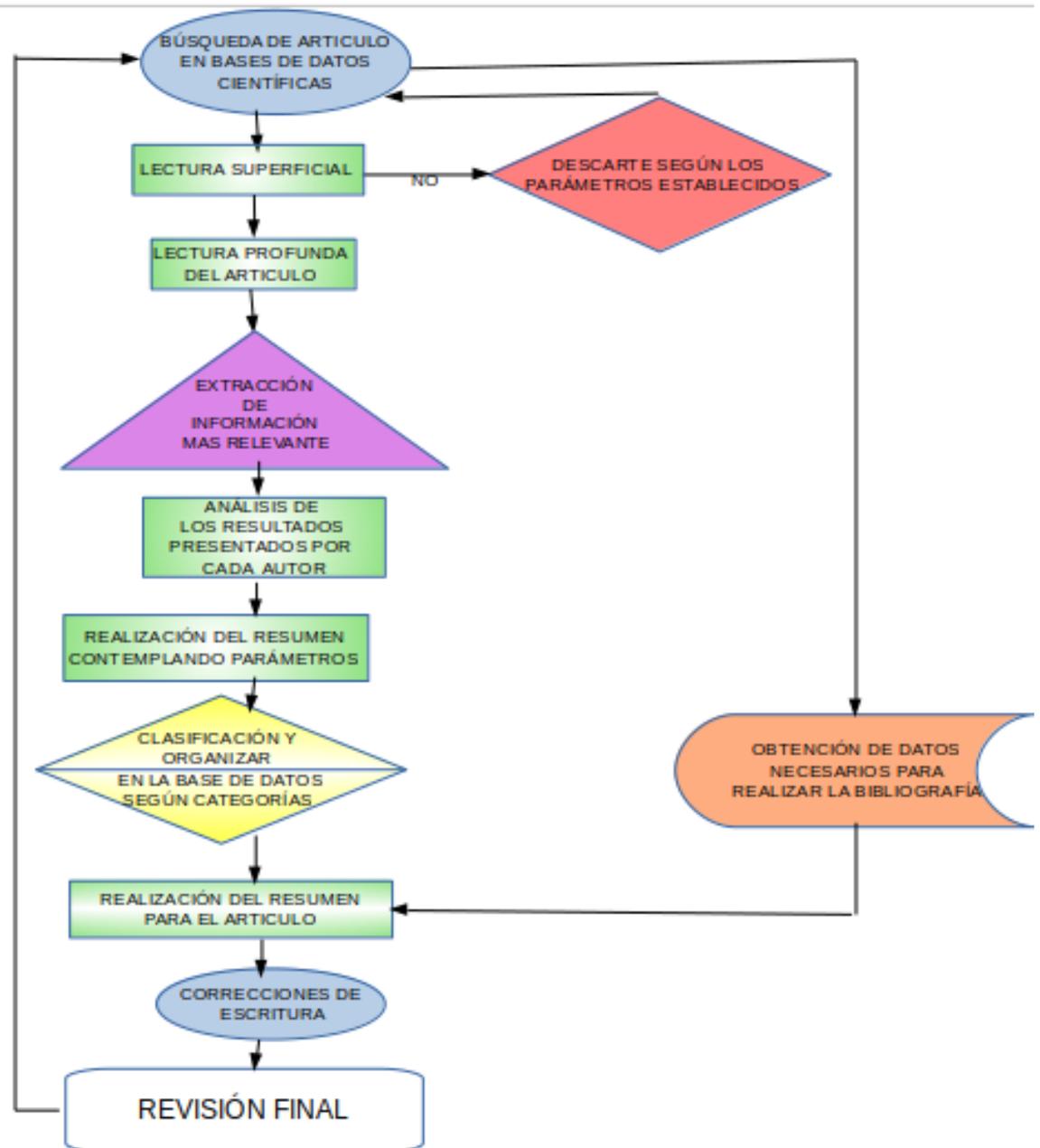
| Categoría                      | Número de artículos |
|--------------------------------|---------------------|
| Modelos e Irreversibilidades   | 4                   |
| Nivel Colombia y Latinoamérica | 4                   |
| Aplicaciones                   | 42                  |
| Simulaciones                   | 42                  |
| Aplicaciones de energía solar  | 4                   |
| Total artículos revisados      | 96                  |

*Fuente - Elaboración propia*

De acuerdo al proceso presentado en la Figura 8, se puede evidenciar el hecho de la realización de un análisis de resultados a cada uno de los artículos revisados, donde se definió presentar en el producto final el resultado más importante de cada investigación, bajo los parámetros previamente descritos.

Para dar solución al objetivo general se realizó una condensación de las revisiones presentes en la base de datos generada, donde se evidencio la escases de algunos temas por lo que se decidió reagrupar las categorías del artículo a aplicaciones y simulaciones teniendo y cada una de estas se segmento teniendo en cuenta el tipo de fuente de energía usada en cada caso, además se presentan los conocimientos básicos y generalidades a tener en cuenta para el estudio de sistemas que comprenden un motor Stirling.

Figura 8- Diagrama de proceso para la revisión de un artículo



Fuente - Elaboración propia

## 6 ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

Para el análisis bibliográfico se procedió a revisar investigación por investigación, donde se adquirió el conocimiento presentado en cada artículo y se definió solamente usar los valores más significativos para cada caso, donde se destaca el uso de los diferentes montajes experimentales así como de las diferentes formas de afrontar nuevos modelos y validarlos, con el fin de generar una idea clara para un lector que necesite saber dónde están los avances en motores Stirling y cuáles son las pautas más importantes a desarrollar.

### 6.1 APLICACIONES

Para el análisis bibliográfico se procedido a la clasificación anteriormente descrita donde se presentó dos categorías empezando por las aplicaciones de motores Stirling. Con lo que se puede encontrar las siguientes revisiones, las cuales son aplicaciones orientadas al uso de biomasa donde se aprovechan los gases producidos en la combustión para calentar el cilindro caliente del motor:

Crema et al [18] Diseñan un sistema de micro CHP (Combined heat and power) motor Stirling alimentado por un quemador de biomasa de madera usando aire como fluido de trabajo el sistema pretende generar un ahorro alrededor de 200 euros para la generación de potencia, el sistema genera 1 KW de energía mecánica con el cual tiene la capacidad de generar 222,9 vrms (voltage root mean square) y una PE de 1,5 KW al trabajar a una velocidad de 1500 rpm y alcanzando una eficiencia de 89,2%.

Wilke et al. [19] Hacen un estudio del diseño de un motor Stirling alimentado por medio de la combustión de biomasa para la generación de energía eléctrica, este estudio realiza un análisis de las diferentes compañías que construyen y trabajan con este tipo de tecnologías capaces de ser aplicadas en sectores donde la energía eléctrica es escasa, por medio de este estudio se encuentra un prototipo desarrollado por la empresa Danstokeer industries de Dinamarca, con el cual se genera una potencia de 150 kW con una eficiencia de 26 %.

Manrique et al. [20] Diseña y construye un MSB con VD de 679 cc para la generación eléctrica alimentado a partir de la combustión de biomasa residual. El sistema obtiene una potencia de 500W cuando trabaja con una diferencia de temperaturas de 370 °C y una velocidad de rotación de 1000 rpm y una eficiencia de 40%.

Arashnia et al. [21] Presentan el estudio de una micro-planta de generación de energía eléctrica donde se utiliza un motor Stirling tipo gama (MSG) con un VD de 580 cc, el sistema se calienta por medio de la combustión de diferentes materias primas de biomasa (polvo de madera, bagazo de caña de azúcar, paja de trigo, madera de álamo) y está diseñado para trabajar en una rango entre 500 a 600 rpm, una TCC de 550 °C y una presión de 10 bar. El estudio encontró que a una velocidad de 600 rpm se genera 96,7 W de potencia y se obtiene una eficiencia térmica de 20%.

Podesser. [22] Diseña y construye un MSA con un VD de 840 cc que utiliza aire como fluido de trabajo, el sistema es alimentado por una caldera donde se utiliza biomasa como combustible y está diseñado para aplicarse en zonas rurales para generar energía eléctrica. El MSA es puesto en marcha con una diferencia de temperaturas de 700 °C y tiene la capacidad de entregar una potencia eléctrica de 3,2 W con una eficiencia de 25 %.

Lane et al. [23] Realiza la construcción de un motor Stirling de pistón libre funcionando con un quemador de biomasa producida en zonas rurales de Sudáfrica, el cual es capaz de generar una TCC de 470 °C y TCF de 85 °Cy usando He como fluido de trabajo; el sistema es puesto en marcha a una diferencia de temperaturas de 350 °C con el cual se obtiene una potencia máxima eléctrica de 1100 W y una potencia mecánica de 1250 W con una presión de 30 bar y una ET de 81,9 %.

Carlsen et al [24] Diseña un MSG con Vd de 4556 cc el cual es impulsado por medio de la combustión de viruta de madera, el motor cuenta con 4 pistones y se utiliza helio como fluido de trabajo; el sistema se pone en marcha a una TCC de 953 K y una presión de operación de 43 bar, bajo estas condiciones se obtiene una velocidad de rotación de 1200 rpm y genera una potencia de 40 KW con una ET de 35%.

Damirchi et,al [25], Estudia el diseño de un MSG con un VD de 220 cc y un volumen total de 580 cc, en el sistema se usa He como fluido de trabajo y se alcanza una TCC entre 540 y 560 °C con una presión de 10 bar y una velocidad angular de 700 rpm, para lograr estos parámetros se usa la combustión de biomasa (bagazo paja de trigo, madera de álamo y aserrín). El sistema se estudia en dos fases, la primera experimental donde se obtiene una potencia al freno de 97,7 W y la segunda por simulación del MSG se tiene 1000 W, mientras que con el análisis del ciclo Schmidt se obtiene una potencia de 800 W y una ET de 16 %.

Por otro lado del análisis de revisión de aplicaciones se tiene aquellas con un desarrollo experimental donde se destaca el uso de la combustión de derivados del petróleo como lo es GLP, los cuales transfieren su energía térmica directamente al cilindro caliente por medio de convección entre los gases productos de la combustión y el cilindro caliente, teniendo así los siguientes artículos:

Cacho et al. [26] Desarrollan un MSB con un VD de 1252 cc para la generación de energía eléctrica, se pone en marcha por medio de la combustión de gas licuado de petróleo (GLP), usando aire como fluido de trabajo y enfriado por agua. El análisis experimental determina que el MSB obtiene una potencia máxima de 58 W y una potencia eléctrica de 35 W con un consumo de combustible de 1,3 kg/h.

Díaz et al [27], Realizan el diseño CAD de un motor Stirling de pistón libre con un VD de 709 cc, simulado sin tener en cuenta las pérdidas del sistema y con

una TCC de 873 K y una TCF de 363 K, bajo estas condiciones se obtiene un trabajo de 68,08 J y 1260 W de potencia, realizando el análisis experimental se tienen en una potencia aproximada de 1206 W y un trabajo en el motor de 66,64 J y una EC de 58,41 %. Para explicar la diferencia entre la simulación y el análisis experimental se incorpora al modelo un estudio matemático el cual calcula las pérdidas del sistema y se determina que el trabajo perdido es de 1,44 J y una potencia perdida de 53,3 W.

Karabulut et al [28], estudiaron un MSB con un VD de 525 cc con He como fluido de trabajo, para hacer funcionar el motor se usa un quemador de GLP logrando una diferencia de temperatura de 233 °C en el motor, obteniendo bajo estas condiciones una velocidad de 600 rpm, un torque de 3 Nm y una potencia de 120 W trabajando bajo una presión de 4 bar.

Idroas et al [29], Diseñan y fabrican un MSA el cual tiene un Vd de 411 cc con aire como fluido de trabajo; el sistema es puesto en marcha mediante la combustión de GLP logrando una TCC entre 800 y 900 °C; El experimento determina que una adecuada temperatura de funcionamiento del motor esta entre 800 y 830 °C donde se obtiene una PM de 5,5 W y una velocidad de operación de 700 rpm dando una ET de 0,6 %. Sin embargo, cuando el sistema sobrepasa la temperatura aconsejada la potencia cae de forma gradual

Otra aplicación a destacar es aquella que presenta el uso de calentadores los cuales funcionan desde la combustión de GLP, hasta el calentamiento de resistencias eléctricas las cuales están en contacto con el cilindro caliente transfiriendo así toda la energía térmica por medio de conducción, teniendo así las siguientes revisiones

Shahed et al. [30] Realiza el diseño de un MSB con un VD de 6069 cc y usando He como fluido de trabajo, para ser aplicado en los sectores rurales de Bangladesh, el diseño del MSB se realiza en AutoCAD y posteriormente es simulado en Matlab con el objetivo de determinar las condiciones óptimas de

operación. El sistema trabaja con una TCC de 463 K la cual es suministrada por la reutilización de los gases emitidos por un calentador doméstico y una TCF de 313 K, obteniendo una potencia al freno de 52 W al trabajar a 1000 rpm y con esto generando 47 W de potencia eléctrica y ET 32,3 %.

Manrique et al. [31] Desarrollan el diseño de un MSB con un VD 393 cc y usando aire como fluido de trabajo, La TCC es de 300 °C, la cual se logra por medio de la reutilización de los gases emitidos por una caldera de ladrillo refractario, generando una PM de 30 W a una velocidad angular de 180 rpm y una EC de 80,5 %.

Mora [32] Plantea el diseño y construcción de una central termo solar compuesta por un motor Stirling y un colector solar parabólico equipado con un sistema de seguimiento solar. El motor Stirling funciona a una velocidad de 600 rpm y una diferencia de temperatura de 125 °C entre cilindros, obteniéndose con una radiación estimada de 385 Wm<sup>-2</sup> en el colector, el sistema bajo estas condiciones genera una PM de 1,1 W con la cual se genera una corriente de 0,5 A y un voltaje de 2,2 V.

Batmaz et al. [33] Realizan la construcción de un MSG con un Vd de 380 cc, el cual se pone a funcionar usando un calentador eléctrico a una temperatura entre 650 a 1000 °C; para la prueba en experimental se lleva el sistema hasta la temperatura máxima donde se obtienen los mejores resultados de operación; bajo estos parámetros el sistema genera una velocidad de 1700 rpm a una presión de 1 bar, obteniendo una PM de 110 W con un torque de 1,8 Nm y una EC de 0,66%.

Çinar et, al, [34] Diseñan un MSG con un VD de 276 cc donde se realiza el análisis usando H y aire como fluido de trabajo, el sistema es alimentado por un horno eléctrico el cual es capaz de suministrar una TCC de 1000 °C; para la prueba con H como fluido de trabajo el sistema logra una velocidad de 850 rpm

y genera 129 W de potencia, al usar aire como fluido de trabajo el sistema logra una velocidad de 220 rpm y genera 40 W de potencia.

Karabulut et al. [35] Diseñan y construyen un MSB el cual tiene un VD de 230 cc donde se suministra calor por medio de un calentador trabajando con GLP, en este estudio se plantea modificar la presión interna del motor (1,4; 2,8; 3,5; 4,5 bar y presión atmosférica) dejando constante una diferencia de temperaturas de 173 °C; El análisis experimental se puede evidenciar que los mejores resultados son los obtenidos a 2,8 bar, logrando una velocidad máxima de 450 rpm, una potencia de aproximadamente 50 W y una eficiencia de 15 %.

Çinar et al. [36] Diseñan un MSB con un VD de 192 cc con aire como fluido de trabajo, para alimentar el sistema se usa un calentador eléctrico y se realiza el análisis experimental a diferentes temperaturas (800, 900 y 1000 °C) manteniendo constante la presión interna del motor en 1 atm, obteniendo que a 800 °C el sistema es capaz de proporcionar un torque de 0,1 Nm y generar 1 W de potencia; a 900 °C el sistema genera un torque de 0,22 Nm y una potencia de 4,5 W de potencia; a 1000 °C el sistema logra trabajar con una velocidad de 208 rpm y con esto se logran los mejores resultados al proporcionar un torque de 0,28 Nm y generar una potencia de poco más de 6 W.

EL-Ehwany et al [37] Proponen la modificación de un MSA con VD de 3981 cc, que trabaja con He, donde modifican el intercambiador de calor el cual es acoplado con codos lo cual permite una mejor transferencia de calor; además se usa refrigerante (aceite sintético) el cual pasa a través de los tubos en el enfriador. El sistema trabaja a un delta temperatura de 302.62 °C el cual es suministrada por un calentador, obteniendo como resultados una velocidad máxima de 500 rpm, 9 KW de potencia y una eficiencia de 65 %.

Finalizando la sección de aplicaciones se pudo clasificar, la más importante y probable a solucionar la problemática presentada, ya que se tiene el uso de la

energía solar como fuente limpia, donde gracias a la utilización de concentradores parabólicos y lentes fresnell se logra aumentar la temperatura considerablemente en el cilindro caliente, las siguientes revisiones presentan las investigaciones respecto a esta aplicación:

Kongtragool et al [38] Diseñan un MSG con un VD de 1238 cc, el diseño cuenta con 4 pistones de poder y un cilindro desplazador, el sistema tiene la capacidad de trabajar a una diferencia de temperaturas de 166 °C suministrada por un sistema de bombillas las cuales son capaces de irradiar 7100 W/m<sup>2</sup>; además el motor trabaja a una velocidad de 20 rpm, obteniendo como resultado 6 W de potencia con una eficiencia de 45 %.

Kongtragool et al [39] Estudian la aplicación de un MSG con un VD 6394 cc de dos pistones, el motor usa un sistema de simulador solar el cual proporciona una radiación de 7145 W/m<sup>2</sup>, para el estudio experimental la TCC se varia en 399, 409, 419 y 436 K; los resultados muestran que se obtienen los mejores parámetros de operación con una TCC de 436 K produciendo un torque de 0,35 Nm, una velocidad de 45 rpm, una potencia de 1,7 W y una eficiencia de 0,62 %.

Aksoy et al [40] Realizan el diseño y construcción de un MSB con un VD de 300 cc usando He como fluido de trabajo y para el funcionamiento se usa un simulador solar de lámparas halógenas; el estudio experimental se realiza bajo un intervalo de presiones de 4 a 5 bar, donde a una diferencia de temperaturas de 863 K se logra una velocidad máxima de 375 rpm, un torque de 3,7 Nm, una potencia de 190 W y una eficiencia de 13 %.

Sripakagorn et al [41] Diseñan un MSB con un VD 330 cc, usando aire como fluido de trabajo, el sistema es impulsado por medio de un colector solar cilindro parabólico el cual garantiza una diferencia de temperaturas entre 350 a 500 °C, en este montaje la presión de trabajo es modificada entre 7 y 1 bar; para el estudio experimental el sistema cuenta con un calentador de apoyo

para mantener la diferencia de temperaturas en 500 °C. Los mejores resultados se obtienen a 7 bar, al tener un torque de 3 Nm, una velocidad de 130 rpm, generando una potencia de 70 W y una eficiencia de 9%.

Trayser et al [42] Construyen un MSA donde se analiza el funcionamiento de este sistema siendo impulsado por la energía solar de 300 Btu/hm<sup>2</sup>; se usa un colector solar de disco parabólico con el cual se logra una temperatura máxima de 1650 °F, sin embargo para el experimento se determina una temperatura de 1400 °F debido a que es más fácil mantener esta temperatura. Bajo estas condiciones el sistema genera 50 W de potencia y una eficiencia de 7,5 %; debido a esto los autores conectan el sistema a un multiplicador de velocidad y logran que el motor alcance una velocidad de 2100 rpm y genere 100 W de potencia donde se alcanza una eficiencia de 60%.

Tlili et al [43] Diseñaron y construyeron un MSA con VD de 148 cc que trabaja con H<sub>2</sub>, este es alimentado por un concentrador solar el cual genera una temperatura máxima de 320 °C; el sistema es puesto en marcha con una diferencia de temperaturas de 300 °C, bajo estas condiciones el sistema genera una PM de 257 W con una ET de 49 %.

Garcia et, al, [44] realizan un diseño en la ciudad de Medellín de un MSB que trabaja con aire, el cual es puesto en marcha por medio de un concentrador solar de disco parabólico. El análisis experimental del sistema se realiza bajo una radiación máxima de 4,5 kWh/m<sup>2</sup> generando de esta forma una TCC de 233 °C bajo estos parámetros el sistema genera una PM de 7,35 W con una velocidad de 844 rpm y un torque de 0,083 Nm.

Minassians [45] Realiza el estudio de un motor Stirling de pistón libre con un VD de 500 cc impulsado por medio de colectores solares donde se suministra una energía en el motor de 15 kW el cual alcanza una TCC de 175 °C y una TCF de 25 °C, posteriormente rediseñan la geometría del pistón para disminuir

las pérdidas del motor Stirling, con este nuevo diseño se logró obtener una potencia de 2,4 kW con una ET de 84,7 %

## **6.2 REVISIONES ORIENTADAS A SIMULACIONES**

Otro capítulo que se consideró en el artículo fue el realizado y orientado a simulaciones de las diferentes configuraciones de motor Stirling, con lo que se centran los esfuerzos en obtener los parámetros óptimos de funcionamiento de dichos sistemas, Las siguientes revisiones muestran los resultados más relevantes encontrados en la literatura estudiada.

Martaj et, al, [46] investigaron un motor Stirling tipo alfa (MSA) con dos cilindros de doble efecto, utilizaron el modelo de Andersen para realizar un modelo de trabajo en una dimensión, basado en flujos compresibles y ecuaciones de energía, con pérdidas mecánicas, de energía y en los intercambiadores dirigidos a proyectos de generación de energía a partir de energía solar, lo simularon con condiciones estables en el software Matlab/Simulink, donde se logra obtener según el modelo y los parámetros una eficiencia de alrededor 18% para una potencia máxima (PM) de 8 KW y una salida de fase de 120°.

Martaj et, al, [47] simularon el comportamiento de un motor Stirling tipo beta (MSB) por medio de volúmenes finitos, en los cuales se tiene en cuenta la transferencia de calor y leyes termodinámicas, los resultados obtenidos en la simulación de 0 dimensiones (0D) dan una potencia de salida de 5.9 W y en la simulación de 2 dimensiones (2D), se obtiene una potencia de 6,2 W.

Fila et, al, [48] presentan una estrategia para el control de CHP (combined heat and power) con el modelo capaz de abordar sistemas no lineales y represente los fenómenos físicos simulado en el software Matlab, la finalidad del modelo radica en mejorar las eficiencias de los sistemas CHP partiendo de los diseños de instalación, donde bajo el método RHC (control de horizonte de procesos) obtienen resultados en los cuales un MSB alcanza una temperatura de 250°C

alrededor de 5000 a 6000 segundos después de su inicio provocado por la combustión de biomasa.

Sanchez et, al, [49] exponen un modelo desarrollado para un motor Stirling tipo Gamma (MSG) bajo análisis de presión, temperatura y fluidos de trabajo, para lo cual se basan en modelos termodinámicos, cambiando el fluido de trabajo entre Helio (He), aire e Hidrógeno (H), para resolver el modelo utilizaron el software Matlab, obteniendo como resultados más relevantes el hecho de que al usar aire se tendrá a 250 rpm una eficiencia de Carnot (EC) de 19% a una PM de 20W, para el caso de He se tiene a 450 rpm, una EC de 21% a una PM de 49W y finalmente se tiene el caso del H donde a 900 rpm se obtiene EC de 22,5% con una PM de 82W.

Saravia et, al, [50] muestran los modelos de tipo termo-eléctricos y modelos mecánicos de tipo esfuerzos-flujos para un sistema solar de motor Stirling, bajo el software SimuSol en donde representaron el sistema por medio de símbolos para mejorar su comprensión, de acuerdo a lo anterior se muestra que el motor diseñado es capaz de entregar 650 V con una eficiencia térmica de 26% en un límite de tiempo de 4 s a una velocidad de 710 rpm.

Chimielewski et, al, [51] estudiaron una combinación de un modelo termodinámico junto con un modelo dinámico del sistema pistón – cigüeñal con tres grados de libertad denominado con el nombre modelo multidominio de análisis de Stirling, este modelo fue simulado en el Software Matlab/Simulink, donde se pudo obtener bajo dos temperaturas 900 K y 1400 K, PM de 13,42 KW y 10,02 KW respectivamente.

Glushenkov et, al, [52] presentaron la modelación del motor patentado por Manson<sup>16</sup>, usando aire como fluido de trabajo y un volumen de desplazamiento aproximado de 3,1416 in<sup>3</sup>, del modelo aquí mencionado se obtienen las eficiencias del sistema obtenidas bajo diferentes eficiencias en el

---

<sup>16</sup> Primera publicación de prototipo de motor de Manson [68]

regenerador (ER) y relaciones entrópicas en los diferentes cilindros, obteniendo una eficiencia térmica (ET) de 50% si se logra tener una ER de 98% y una relación de entropías de 0,4; igualmente se presenta la importancia del número alpha el cual es el cociente entre propiedades en el cilindro frío y caliente, obteniendo que para alpha de 0,33 y una relación de entropías de 0,6 se obtendrá una PM de 3KW, y bajo un alpha de 0,25 y un cociente de entropías de 0,6 se obtendrá un PM de 4,5KW.

Luo et, al, [53] presentan el diseño para la optimización de un motor de tipo GPU-3 bajo parámetros de algoritmos de optimización múltiples donde como parámetros de entrada se tiene una TCC de 977 K y una TCF de 288 K, de lo anterior se obtienen a una presión de 4,99 MPa una PM de 8013,9 W y a 2,98 MPa una potencia de 2099,38W logrando una ET máxima de 17,56%.

Dado que los diferentes investigadores realizaron nuevos modelos contemplando más variables se logró considerar así las simulaciones con validación experimental, en donde se realiza una validación real capaz de ratificar la exactitud y desviación que presentan sus modelos y simulaciones, considerando lo anterior se presentan las siguientes revisiones:

Li et, al, [54] presentan un modelo politrópico para el análisis de pérdidas en los motores Stirling, con el fin de predecir el desempeño en los diferentes tipos de motor, partiendo de modelos adiabáticos donde se estudian por velocidades finitas y volúmenes muertos lo cual comprende, perdidas de calor perdidas por fricción, de allí se utiliza un motor tipo GPU-3 el cual es un MSB, con un volumen de expansión de 30,52 cc, utilizando He como gas de trabajo y una presión media de 2,76 MPa, y una temperatura de cilindro caliente (TCC) de 922K y una temperatura de cilindro frío (TCF) de 268 K, con lo cual obtienen una PM de 1000W a 3500 rpm y en el caso experimental a 3500 rpm se obtuvo una PM de 500W, donde se consideró una ET de 10% y 5% respectivamente para cada caso.

Alba et, al, [55] realizan el diseño de un motor Stirling en el software SolidWorks al cual le realizan un análisis térmico y mecánico, para probar su capacidad de estar acoplado a un captador solar de estructura tubular, las pruebas experimentales se realizan entre las 11 am y 1 pm. Los investigadores logran obtener la relación donde se aclara el hecho de que la temperatura y la velocidad en rpm son directamente proporcionales, de allí que logran obtener una velocidad máxima de 513 rpm con una diferencia de temperaturas en los cilindros de 355 °C.

Llie et, al, [56] desarrollan un modelo basado en principios de transferencia de calor, la cual se analiza de forma teórica bajo el software COMSOL Multiphysics 3,5 y de forma experimental en un MSB, donde el sistema es alimentado por medio de energía solar por medio de lentes Fresnell como concentrador de energía, la irradiación solar obtenida fue de 1115 W/m<sup>2</sup>, logrando obtener una diferencia de temperatura máxima de 49,96 K.

Tavakolpour et, al, [57] modelan bajo principios de ciclos Termodinámicos y de ciclo Schmitd, un MSG acoplado a un colector solar de placa plana, donde se tienen diferencias de temperatura de 80 °C, obteniendo como resultado el hecho de que al tener una TCC de 110°C y TCF de 25 °C, obtuvieron un torque máximo <sup>TM</sup>, de 0,2 Nm a una velocidad de 12 rpm. De allí, se establece la importancia del regenerador ya que para una ER de 100 % se podrá lograr ET de 69 %.

Araoz et, al, [58] Desarrollan y validan un modelo numérico basado en principios termodinámicos, de transferencia de calor, perdidas mecánicas y térmicas de los elementos, el cual es capaz de representar un MSG, para lo cual los autores dividen el sistema en 5 módulos con el objetivo de aumentar la exactitud de modelo. Los resultados obtenidos muestran que el MSG debe tener un VD de 251,3 cc con aire como fluido de trabajo, logrando una temperatura en el enfriador de 288 K, destacando la PM de 53,58 W la cual

requiere un flujo de calor de entrada de 1854,35 W bajo una ET de 16,10%, una EM de 18,10% y una eficiencia de freno de 2,90%,

Acharya et, al, [59] Investigaron un sistema de generación de energía eléctrica basado en un motor Stirling accionado por la energía solar dirigida por lentes Fresnel y un sistema de Pellets<sup>17</sup> de zeolita impregnados con sulfato de magnesio para el almacenamiento térmico, el sistema alcanza una TCC de 480 °C, modelado utilizando los principios de la teoría de Schmitd, donde el motor usa aire como fluido de trabajo, y un VD de 500 cc, trabajando en el hemisferio norte a diferentes latitudes (0, 15, 30, 45, 60, 85 grados) con ER de 80 %; Obteniendo como mejor resultado el hecho de que entre las 10 y 14 horas, a lo largo de las latitudes se logra una potencia solar promedio de 2800 W lo que se traduce en una PM mecánica de 1,3 kW y una PE de 1,04 kW constantes a lo largo del año.

Shazly et, al, [60] estudiaron un sistema de motor Stirling accionado por energía solar donde se centran en desarrollar un modelo tanto para el concentrador de energía y en el modelo del motor Stirling basándose en los principios expuestos en la fórmula de Beale<sup>18</sup>, donde utilizan la herramienta MATLAB/GUI para dar solución a los modelos obteniendo como resultados el hecho de que la radiación global promedio para la locación de Guiza Egipto el día 2 de Marzo de 2013, posee su pico máximo entre las 11am y la 1 pm donde se obtiene alrededor de 900 W/m<sup>2</sup>, logrando una temperatura en el calentador de 64,2°C y potencia de salida de cigüeñal de 0,5171W a una velocidad de 126 rpm.

---

<sup>17</sup>Los Pellets o gránulos de Zeolita son capaces de conservar gran cantidad de energía al ser deshidratados por cualquier fuente de calor, gracias a su comportamiento químico [59].

<sup>18</sup>El número de Beale es un parámetro de caracterización para determinar con facilidad las estimaciones de las potencias entregadas por un motor Stirling. [67]

Mendoza et, al, [61] desarrollan una metodología para el cálculo de sistemas Stirling-DISH19 a partir de factores climáticos suministrados por la estación meteorológica de la universidad federal de Itajuba. De allí desarrollan modelos matemáticos basados en principios térmicos de motores Stirling y colectores solares. Para la solución del modelo utilizaron las herramientas computacionales Matlab y Fortran, donde se alcanza según los modelos una ET de 32 % con el motor trabajando a 1800 rpm y una PM de 5 KW

---

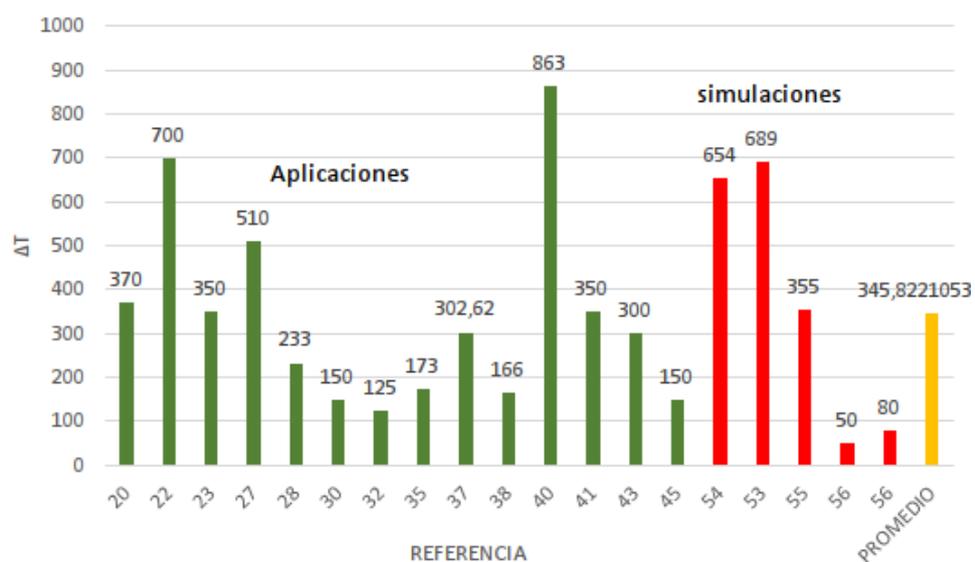
<sup>19</sup>Dish es un sistema en el que se usa concentradores solares para aumentar la temperatura en un punto donde el fluido de trabajo se aprovecha en un motor Stirling para la generación de energía [61].

## 7 ANÁLISIS DE LA REVISIÓN

Con base en los estudios analizados en el presente artículo se puede destacar el hecho de que los motores que operan bajo ciclo Stirling presentan grandes ventajas gracias a que pueden trabajar con cualquier tipo de fuente de calor como lo puede ser la combustión de biomasa o de combustibles fósiles no convencionales (GLP), calentadores usados directamente en el motor y mediante la concentración de radiación solar, lo que lo hace una maquina motora versátil y atractiva para la transformación de energía térmica a energía mecánica para la generación de energía eléctrica.

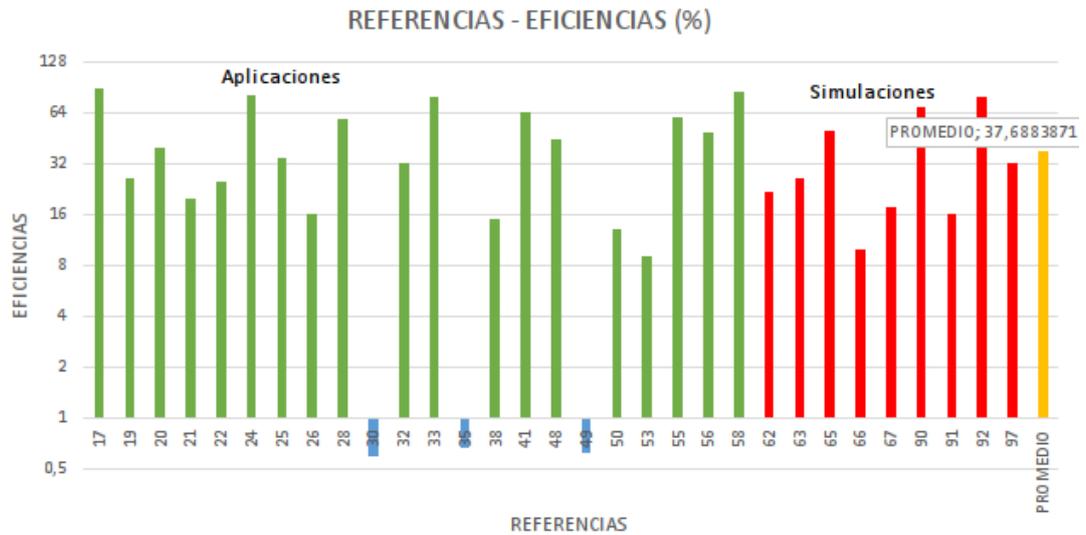
Los estudios analizados presentan la importancia que tiene la diferencia de temperaturas en los cilindros frío y caliente en el rendimiento del motor, de acuerdo a la revisión hecha, está en promedio fue de aproximadamente 346 K como se puede evidenciar en la Figura 9, con la cual el motor Stirling en promedio logro una eficiencia de alrededor de 38 % como se muestra en la Figura 10; además los autores resaltan la importancia de lograr un delta de temperaturas alto, ya que esta variable es directamente proporcional a la eficiencia del sistema, razón por la cual varios autores utilizan diferentes mecanismos para refrigerar el cilindro frío del motor.

Figura 9 - Delta de temperaturas en función de las referencias



Fuente 1 - Elaboración propia

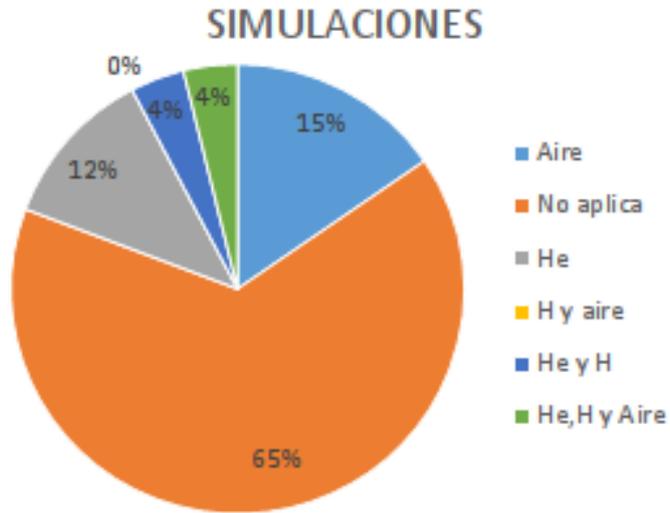
Figura 10 - Eficiencias en función de las referencias



Fuente - Elaboración propia

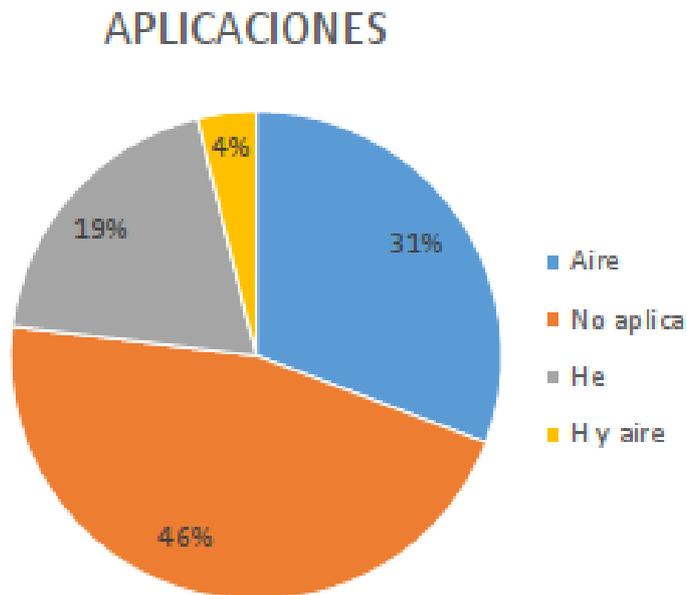
Además se puede evidenciar que la gran ventaja de este tipo de motores es que pueden funcionar con diferentes fluidos de trabajo como lo son Aire u otros que posean buenas propiedades de transferencia de calor y baja viscosidad como He e H [49], esta variable se considera un factor muy importante en el momento de la determinación de los parámetros óptimos de operación, se pudo comprobar en la literatura que el Helio fue usado por al menos el 12 % de los estudios de simulaciones analizados y el 19 % de los investigadores que realizaron un desarrollo experimental como se presenta en las Figuras 11 y 12, sin embargo, en estas Figuras se puede evidenciar que los casos en los cuales no aplica o no se mencionaba el tipo de fluido usado por los investigadores, podría considerarse Aire ya que este es el gas más abundante y de fácil de acceso en el planeta.

Figura 11- Resultados de usos de fluidos de trabajo en simulaciones.



Fuente - Elaboración propia.

Figura 12 - Resultados de usos de fluidos de trabajo en aplicaciones



Fuente- Elaboración propia

Además se puede evidenciar la tendencia por parte de los investigadores de usar la configuración Beta, como se presenta en las Figuras 13 y 14, en estas figuras se logra apreciar que en la sección de simulaciones este tipo de motor

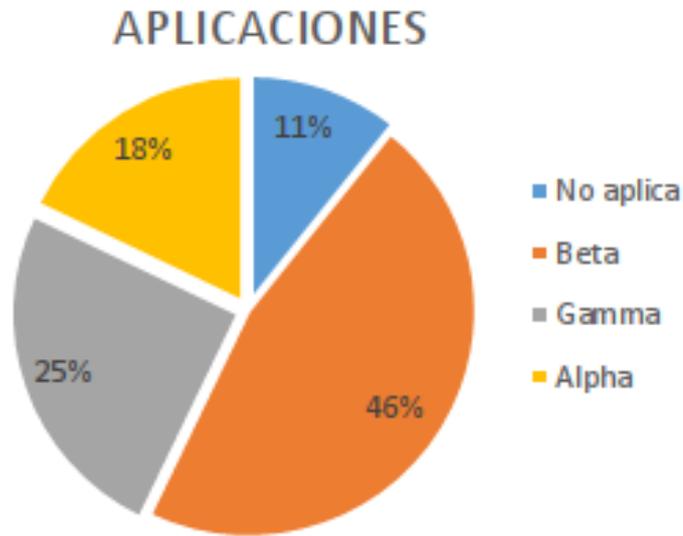
Stirling fue utilizado por el 38 % de los investigadores consultados y en aplicaciones fue usado por el 46 %, esto es debido a que al ser una distribución de un solo cilindro se considera el más elemental y fácil de manufacturar ya que fue el primero en ser construido [68], igualmente otra razón por la cual es el más usado es la existencia de un MSB comercial denominado GPU-3, como se menciona en la literatura consultada.

Figura 13 - Porcentaje de tipos de motores usados en simulaciones para este documento.



Fuente- Elaboración propia

Figura 14- Porcentaje de tipos de motores usados en aplicaciones para este documento.



Fuente - Elaboración propia

La revisión muestra que las simulaciones de motores Stirling pueden ser hechas mediante modelos que contemplen la mayor cantidad de variables como lo son temperatura, presión, revoluciones de trabajo, entre otras inmersas en el sistema, donde se evidencian el análisis de transferencia de calor, termodinámico, comportamientos físicos y contemplando las pérdidas propias de cada caso así como las pérdidas propias reales del ciclo Stirling, o realizadas por medio de la teoría del ciclo Schmitd la cual presenta los valores más cercanos a los resultados experimentales cuando se tiene en cuenta las pérdidas mecánicas y térmicas que tiene el sistema. Por otro lado, la revisión resalta la importancia de validar las simulaciones, realizando pruebas experimentales, donde se utilicen diferentes fluidos de trabajo con el objetivo de comparar y comprobar los datos obtenidos en los modelos.

## 8 CONCLUSIONES

- Con el desarrollo de este artículo de revisión se logró encontrar la necesidad de impulsar e incentivar en Colombia la investigación de sistemas como lo son las aplicaciones donde se utilicen los motores Stirling ya que la condición de este tipo de estudios en el país es demasiado pobre al igual que a nivel de Latinoamérica lo que genera un déficit científico en este tema, a pesar que el estado colombiano brinda beneficios al entrar en la línea de trabajo con fuentes de energías no convencionales.
- Con la realización de las revisiones se logró comprobar el potencial de los sistemas Stirling gracias a su condición de combustión externa ya que son eficientes a la hora de usar energía desechada por otros instrumentos como calderas o hasta usar energía para transformarla en energía eléctrica, lo que permite dar el potencial a los motores Stirling como sistemas amigables con el ambiente si se usan con sistemas de captación de radiación solar o hasta el uso de biomasa, presentando así un potencial para su desarrollo en Colombia gracias a su condición geográfica.
- El análisis de la revisión de los diferentes artículos logra evidenciar la relación que existe entre las diferentes variables de operación de los motores Stirling tales como las temperaturas de trabajo, los fluidos de trabajo usados y los materiales de los cuales este compuesto el motor, con las eficiencias entregadas, donde se logra evidenciar la tendencia de los investigadores a usar materiales como aluminio en el motor y el uso de He como fluido de trabajo más común.
- Con este trabajo se puede evidenciar como las tecnologías no exploradas podrían ser un aporte importante para tener a futuro nuevas fuentes de energía no convencionales con la capacidad funcionar con

diversas fuentes de energía y ser aplicados en diversos campos como doméstico y hasta industrial. Por lo que se considera de vital importancia el realizar investigaciones más profundas donde se logre evidenciar los parámetros óptimos de funcionamiento de los sistemas que posean un Motor Stirling.

## 9 RECOMENDACIONES

- Se recomienda para futuras investigaciones respecto al tema realizar una revisión más extensa en bases de datos que comprendan revistas indexadas de categoría Q1.
- Promover la ampliación de las categorías de la investigación en las cuales no se pudo presentar las suficientes revisiones.
- Establecer categorías más amplias y profundas en las cuales se pueda segmentar de mejor forma teniendo en cuenta tanto el tipo de estudio como el fluido, el tipo de motor y el volumen del trabajo entre otros.
- Se recomienda para la realización de futuros trabajos de revisión el uso de una base de datos propia donde sea posible evidenciar las categorías, los datos de la investigación, el proceso y los resultados.
- Utilizar los diferentes tipos de software que faciliten y controlen el manejo de uso de referencias bibliográficas.

## 10 Bibliografía

- [1] Kreith F, Goswami D, Y , The CRC Handbook of Mechanical Engineering, 2005..
- [2] Aguero V, R, Diseño y construcción de un motor Stirling para lageneración de energía eléctrica, 2006..
- [3] Duan C, Wang X, Shu S, Jing C, Chang H, Thermodynamic design of Stirling engine using multi-objective particles warm optimization algorithm, 2014; 84, 88 - 96, doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.003..
- [4] Tlili I, Thermodynamic Study on Optimal Solar Stirling Engine Cycle Taking Into Account the Irreversibilities Effects, 2012; 14, 584 - 591,doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.979..
- [5] GCE. Manual del sector de la energía. Quema de combustible. 2012.
- [6] Ecopetrol, histórico de regalías 1994- 2003. (online)(página oficial de Ecopetrol), república de Colombia 2016, (citado diciembre 7 2016). disponible en <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/informacion-fina>.
- [7] AGH, agencia nacional de hidrocarburos. Producción mensual de petróleo, estadísticas (online) (página del gobierno), república de Colombia 2016, (citado diciembre 7 2016). disponible en: (<http://www.anh.gov.co/Operaciones-Regalias-y-Participaciones/Sist>).
- [8] González-Bayón J. J, Quintero-Cabrera D, Borrajo-Pérez R, Análisis de irreversibilidades en el comportamiento de un motor Stirling. Ingeniería mecánica, 2011; 4, 99 - 106,ISSN 1815-5944...
- [9] Sanchez V. R, Estado actual de la tecnología de motores stirling, Monografía, 2011..
- [10] Toledano J. I. P, Simulacion de un motor stirling mediante modelos de primer orden, 2013..
- [11] Payri F. Desantes J, Motores de combustión interna alternativos, 2011..
- [12] Kongtragool B, Wongwiset S, A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines, 2003; 7(2), 131 – 154, doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00053-9..
- [13] Guillermo M. H, Salvador S. R. J, Diseño de un prototipo de un motor Stirling. Mexico D.F, 2013..

- [14] Cengel Y, Boyles M, Termodinámica, MC Graw Hill, sexta edición, 2012..
- [15] Toledano J. I. P, Simulación de un motor Stirling mediante modelos de primer orden, Bachelor's thesis, 2013..
- [16] Cengel Y. A, Transferencia de calor y masa.(4a. ed.) McGraw-Hill Interamericana, 2011..
- [17] Martini W. R, Stirling engine design manual, Division of Transportation Energy Conservation, 1978..
- [18] L. Crema, F. Alberti, A. Bertaso y A. Bozzoli, «Development of a pellet boiler with Stirling engine form m-chp domestic application,» Springer Open, Trento , 2011.
- [19] Wilke H, Silva E. Desenvolvimento de um modelo combustor biomassa-motor stirling aplicado a sistemas de geração isolado e baseados em gerador de indução..
- [20] Manrique S, Franco J, Núñez V, Construcción de un prototipo stirling de baja potencia para su empleo en ámbitos rurales a partir de fuentes de energía renovable, ASADES, Argentina, 2009.
- [21] Arashnia, Najafi, Ghobadian, Talal, Mamat, Kettner, Development of micro-scale biomass-fuelled CHP system using stirling engine, 2015; doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.505..
- [22] Podesser E, Electricity production in rural villages with a biomass stirling engine, 1999; pp. 1049-1052, doi: 10.1016/S0960-1481(98)00369-3..
- [23] Lane, Beale, A biomass-fired 1 kW Stirling engine generator and its applications in South Africa..
- [24] Carlesen, Ammundsen, Traerup, 40 KW stirling engine for solid fuel, Dinamarca , 2002, doi: 10.1109/IECEC.1996.553904..
- [25] Damirchi, Najafi, Alizadehnia, Mamat, Noor, Micro Combined Heat and Power to Provide Heat and Electrical Power Using, 2016,; pp. 1-30, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.118..
- [26] Cacho L, Zamora A, Generacion de energia electrica con un motor stirling empleando un combustible gaseoso, Bachelor Thesis,2007..
- [27] Diaz A. Pinedo R, Propuesta de diseño de un motor stirling de piston libre tipo tandem para uso domestico, Bachelor Thesis, Mexico, 2014..
- [28] Karabulut, Çinar, Yücesu, Torque and power characteristics of a helium charged Stirling engine with a lever controlled displacer driving mechanism,

2009; vol. 35, pp. 138-143, doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.023.

- [29] Idroas, Farid, Zainal, Noriman, Azman, Mechanical power assessment of an alpha V-type stirling engine converted diesel engine, 2011; vol. 6, pp. 160-166, doi: repository.um.edu.my/id/eprint/114387.
- [30] Shahed M. Sufian A, Design of a Stirling Engine to Generate Green Energy in Rural Areas of Bangladesh, Bachelator Thesis, 2014..
- [31] Manrique S, Franco J, Núñez V, Construcción de un prototipo stirling de baja potencia para su empleo en ámbitos rurales a partir de fuentes de energía renovable, ASADES, Argentina, 2009, ISSN: 0329-5184.
- [32] Robles P. M. Diseño, construccion y control de una central didactica termosolar de alta temperatura mediante el generador stirling. Bachelator Thesis, 2016,.
- [33] Batmaz, Üstün, Design and manufacturing of a V-type Stirling engine with double heaters, 2008; vol. 85, pp. 1041-1049, doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.02.021..
- [34] Çınar, Karabulut, Manufacturing and testing of a gamma type stirling engine, 2005; p. 10, doi.org/10.1016/j.renene.2004.04.007.
- [35] Karabulut, Serder, Çınar, Akosoy, An experimental study on the development of a b-type Stirling engine for low and moderate temperature heat sources, 2009; pp. 68-73, doi:10.1016/j.apenergy.2008.04.003..
- [36] Çınar, Yucesu, Topgul, okuer, Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure, 2005; vol. 81, pp. 351-357, doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.08.004..
- [37] El-Ehwany, Hennes:Eid y El-Kenany, Development of the performance of an alpha-type heat engine by using elbow-bend transposed-fluids heat exchanger as a heater and a cooler, vol. 52, pp. 1011-1019, 2011 doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.029..
- [38] Kongtragool, Wongwises, A four power-piston low-temperature differential stirling engine using simulation solar energy as a heat source, 2008; pp. 493-500, doi.org/10.1016/j.solener.2007.12.005..
- [39] Kongtragool y Wongwise, Performance of a twin power piston low temperature differential stirling engine powered by a solar simulator, 2007, vol. 81, pp. 884-895, doi.org/10.1016/j.solener.2006.11.004..
- [40] Akoy, Karabulut, Çınar, Solmaz, Özgörena, Uyumazc, Thermal performance of a Stirling engine powered by a solar simulator, 2015; vol.

86, pp. 161-167, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.047..

- [41] Sripakagorn, Srikam, Design and performance of a moderate temperature difference Stirling engine, pp. 1728-1733, 2011, doi.org/10.1016/j.renene.2010.12.010..
- [42] Trayser, Eibling, 50-Watt Portable Generator Employing a Solar-Powered Stirling Engine, vol. 11, pp. 153-159, doi: 10.1016/0038-092X(67)90023-0..
- [43] Tlili, Timoumi, Nasrallah, Analysis and design consideration of mean temperature differential Stirling engine for solar application, 2007; vol. 33, pp. 1911-1921, doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.024..
- [44] Garcia, Paris, Diseño de un sistema prototipo de conversion de eergia solar en potencia mecanica compuesto por un concentrador solar y un motor stirling,2011. .
- [45] Minassians A. D, Stirling Engines for Low-Temperature Solar-Thermal-Electric Power Generation, Bachelor Thesis 2007..
- [46] Martaj N, Rochelle P, 1D modelling of an alpha type Stirling engine, 2014, doi: 10.1051/smdo/2013019..
- [47] Martaj N, Grosu L, Rochelle P, Savarese S, Bennacer R, Beta type refrigerating stirling machine:numerical and experimental study,1054-853X..
- [48] FLILA S, Rachid A, Dynamic modelling and Control of a m-CHP system with Stirling Engine, 2014..
- [49] Sánchez J, Román R, Frederick G, Modelación un Motor Stirling tipo gama para bajas entalpías, 2010, ..
- [50] Saravia L, Alía de Saravia D, Echazú R, Alcorta G, Simulacion de sistemas termomecánicos solares conel programa simusol , el motor Stirling :simulacion y construcción, 2007, ISSN 0329-5184.
- [51] Chmielewski A,Gumiński R, Maćzak J, Selected properties of the adiabatic model of theStirling engine combined with the model of thepiston-crankshaft system..
- [52] Glushenkov M, Sprenkeler M, Kronberg A, Kirillov V, Single-piston alternative to Stirling engines, 2012, doi:10.1016/j.apenergy.2011.12.050..
- [53] Luo Z, Sultan U, Ni M, Peng H, Shi B, Xiao G, Multi-objective optimization for GPU3 Stirling engine by combiningmulti-objective algorithms, 2016, doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.008..

- [54] Li R, Grosu L, Li W, New polytropic model to predict the performance of Beta and Gamma type Stirling engine, 2017; doi 10.1016/j.energy.2017.04.001.
- [55] Alba C, Geovani E, Borja F, Arturo M, Diseño y construcción de un motor prototipo de ciclo Stirling a base de energía solar, 2009,...
- [56] Ilie S, Toader D, Barvinschi F, Modern education on renewable energies by using numerical Finite Element Method of a solar powered Stirling engine with heat transfer simulations, 2016; 137 - 140, doi: 10.1109/ISETC.2016.7781076..
- [57] Tavakolpour A.R, Zomorodian A, Golneshan A, Simulation, Construction and testing of too - cylinder solar Stirling engine powered by a flat - plate solar collector whithoat regenerator, 2008; 33(1), 77-87, doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.004..
- [58] Araoz J. A, Cardozo E, Salomon M, Alejo L, Fransson T, Development and validation of a thermodynamic model for the performance analysis of a gamma Stirling engine prototype, 2015; 83, 16 - 30, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.006..
- [59] Acharya S, Bhattacharjee S, Stirling engine based solar-thermal power plant with a thermo-chemical storage system, 2014; 86, 901 - 915,doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.030..
- [60] Shazly J. H, Hafez A. Z, El Shenawy E. T, Eteiba M. B, Simulation, design and thermal analysis of a solar Stirling engine using Matlab, 2014; 79, 626 - 639,doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.001..
- [61] Mendoza S, Vidal J. R, Cobas V. M, Silva E. E, López Y. U, Proyección de un sistema Dish/Stirling para generación distribuida, 2014; 45, 64 - 74..
- [62] Comision de regulacion de energia y gas , «ASPECTOS JURÍDICOS AMBIENTALES PARA PROYECTOS DE GENERACION DE ENERGIA EN COLOMBIA,» Bogota, 2008.
- [63] Secretaria General de la alcaldia de Bogotá D.C, «Alcaldia de Bogotá,» 27 Febrero 1990. [En línea]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=254>.
- [64] C. Republica de Colombia, «El estado de la ciencia en colombia,» pp. 109-111, 2013.
- [65] Semana, «¿ Y donde estan los ingenieros?,» *Semana* , p. 1, 2014.
- [66] C. d. Colombia, «Ley # 1715,» *Republica de Colombia* , pp. 1-26, 2014.

- [67] Kongtragool B, Wongwiset S, Theoretical investigation on Beale number for low temperature differential Stirling engines. In Proceedings of the second international conference on heat transfer, 2003..
- [68] Manson; AD. a novel hot-air engine;  
<http://www.stirlingengines.org.uk/work/cyc2.html>, ultimo acceso 14/06/2017.
- [69] Quemado J. M. M, Gonzales E. El futuro de los Combustibles Fósiles..