

Escola Universitària Politécnica de Mataró

Centre adscrit a:



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE UN SISTEMA CON MOTOR STIRLING PARA TRANSFORMAR ENERGIA LIBRE EN ELECTRICIDAD

VOLUMEN I

Darío Rodríguez
PONENT: Klara Vekony

TARDOR/PRIMAVERA ANY



TecnoCampus
Mataró-Maresme

SUMARIO

1. MEMORIA
2. PLANOS
3. ESTUDIO ECONOMICO

Escola Universitària Politécnica de Mataró

Centre adscrit a:



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA**

Ingeniería mecánica

DISEÑO DE UN SISTEMA CON MOTOR STIRLING PARA TRANSFORMAR ENERGIA LIBRE EN ELECTRICIDAD

Memoria

**Darío Rodríguez Cabeza
PONENT: Klara Vekony**

PRIMAVERA 2016



**TecnoCampus
Mataró-Maresme**

Dedicatoria

Dedicado a todas esas personas que han estado ayudándome en los momentos más complicados del proyecto, familiares, amigos y profesores.

Agradecimientos

Agradezco a mi tutora Klara Vekony, todo el material que me ha facilitado para realizar el proyecto con éxito.

Resum

El projecte tracta de fer un estudi, i validar a nivell teòric i pràctic, d'un sistema de generació d'electricitat arrel d'un motor Stirling que aprofiti la calor residual generada en el Tecnocampus, i d'aquesta manera reduir a petita escala l'efecte hivernacle que això provoca.

Resumen

El proyecto trata de hacer un estudio, y validar a nivel teórico y práctico, de un sistema de generación de electricidad a partir de un motor Stirling, que aproveche el calor residual generado en el Tecnocampus, y de esta manera reducir a pequeña escala el efecto invernadero que este provoca.

Abstract

The project is an study and validate theoretical and practical level, of a system for generating electricity from a Stirling engine, which take the residual heat generated in the Tecnocampus, and this way reduce small-scale effect this causes greenhouse.

Índice

Índice de figuras.	III
Índice de tablas.	V
Glosario de términos.	VII
1. Objetivos.	1
1.1. Propósito.	1
1.2. Finalidad.	1
1.3. Objeto.	1
1.4. Alcance.	1
2. Introducción.	3
3. Motor Stirling.	5
3.1. Breve historia.	5
3.2. Principio de funcionamiento.	6
3.3. Estructuras del motor Stirling.	8
4. Especificaciones técnicas.	27
5. Estudio de mercado.	29
5.1. Generación de electricidad.	29
5.2. Elección del motor Stirling.	31
5.2.1. Tipos básicos del motor Stirling.	31
5.2.2. Tipos de motor Stirling especiales.	35
5.2.1. Comparación de los motores Stirling.	37
6. Diseño y cálculo del sistema.	39

6.1. Diseño del sistema.....	39
6.2. Cálculo de la estructura.....	42
6.3. Cálculo de transmisión.....	46
6.3.1. Transmisión por fricción.....	46
6.3.2. Transmisión por poleas.....	47
6.4. Cálculo eléctrico.....	49
7. Montaje y test del Sistema.....	51
7.1. Montaje del Sistema.....	51
7.2. Verificación y test del sistema.....	53
8. Conclusión.....	55
9. Referencias.....	61

Índice de figuras.

<i>fig. 3. 1. ciclo Stirling. Fuente: JEMSENGINE</i>	8
<i>fig. 3. 2. Estructura de motor Stirling tipo alfa. Fuente: Wikipedia</i>	9
<i>fig. 3. 3. Estructura motor Stirling tipo Beta. Fuente: wikipedia</i>	10
<i>fig. 3. 4. Estructura motor Stirling tipo Gamma. Fuente: wikipedia</i>	11
<i>fig. 3. 5. Como afecta la diferencia de temperatura a la geometria. Fuente: Perry's chemical engineers' handbook</i>	13
<i>fig. 3. 6. Movimiento del pistón y el desplazador, discontinuo a la izquierda y continuo a la derecha y el resultado diagramas p-V. Fuente: The Philips Stirling Engine</i>	19
<i>fig. 3. 7. Simbología de Bateria</i>	24
<i>fig. 3. 8. Simbología puente de diodos</i>	24
<i>fig. 3. 9. Simbología de un transformador</i>	25
<i>fig. 5. 1. Motor Slot</i>	30
<i>fig. 5. 2. Motor Stirling tipo alfa. Fuente: www.ebay.com</i>	32
<i>fig. 5. 3. motor Stirling tipo Gamma. Fuente: www.ebay.com</i>	33
<i>fig. 5. 4. Esquema del funcionamiento del tipo beta. Fuente: www.ohio.edu</i>	34
<i>fig. 5. 5. Motor Stirling tipo beta. Fuente: www.ebay.com</i>	35
<i>fig. 5. 6. Motor Stirling hb7. Fuente: www.boehmstirling.com</i>	36
<i>fig. 5. 7. Motor Stirling LTD. Fuente: www.pasco.com</i>	37
<i>fig. 6. 1. Explicación del sistema.</i>	40
<i>fig. 6. 2. Esquema de elementos de reducción</i>	40
<i>fig. 6. 3. Sistema de recarga de baterías.</i>	41
<i>fig. 6. 4. Diseño de la estructura.</i>	44
<i>fig. 6. 5. Esfuerzos de Von Mises en la estructura.</i>	44
<i>fig. 6. 6. Simulación de la deformación de la estructura</i>	45
<i>fig. 6. 7. Diseño de la polea conductora.</i>	48
<i>fig. 6. 8. Esquema del sistema eléctrico. Fuente: jumptuck.com</i>	50

<i>fig. 7. 1. Motor Stirling LTD</i>	<i>51</i>
<i>fig. 7. 2. Anclaje a presión del motor en la estructura.....</i>	<i>52</i>
<i>fig. 7. 3. Acoplamiento de polea al eje motor.</i>	<i>52</i>

Índice de tablas.

<i>Tabla 5. 1. Comparativa de especificaciones de motores Stirling</i>	<i>37</i>
--	-----------

Glosario de términos.

A_{ff} : área flujo seccional

A_o : area transferencia de calor

C_p : Calor especifico a presión constante

C_v : Calor especifico a volumen constante

C_w : factor de fricción.

D : diámetro interior

D : diámetro exterior

F_s : Schmidt Factor

H : coeficiente de transferencia de calor

k : conductividad termica

L_{reg} : longitud del regenerador

\dot{m} : flujo masico

\dot{m} : flujo masico por unidad de area

m : masa del gas

m_f : masa de gas por medio ciclo

n : Moles

N_{pr} : Numero de Prandtl

N_{re} : Número de Reynolds

N_s : Revoluciones por minuto

\dot{N}_s : Revoluciones por segundo

P : Presión

P : Potencia

P_o : Potencia nominal del motor

Q : Calor

R : Constante de gas ideal

ΔT : diferencia de temperatura

T : Temperatura

T_c : Temperatura fría

T_h : Temperatura Caliente

V : velocidad de la masa

V : Volumen m³

V_c : Volumen de compresión

V_d : Volumen espacio muerto

V_e : Volumen de expansión

V_{max} : Volumen máximo del gas

V_{min} : Volumen mínimo del gas

VR : Volume ratio

V_{reg} : Volumen regenerador

δ : Espacio muerto

η_{reg} : Rendimiento del regenerador

ρ : Densidad

1. Objetivos.

1.1. Propósito.

Diseñar un sistema con motor Stirling de baja diferencia de temperatura para generar electricidad.

1.2. Finalidad.

Prototipar un sistema que incluya un motor Stirling de baja diferencia de temperatura (L.T.D) para la generación de electricidad a partir de calor residual que hay en la Escuela Universitaria Politécnica Mataró.

1.3. Objeto.

Reducir el calor residual que tenemos en la universidad, de esa manera se procederá a adaptar el prototipo para que utilice dicha calor y poder reducir el impacto medioambiental que produce.

1.4. Alcance.

Estudiar los motores Stirling, elegir el modelo óptimo para la solución técnica. Una vez hecho esto, se hará un estudio de las diferentes maneras de generar electricidad a través de la rotación del motor, de aquí se elegirá la mejor opción para la solución técnica.

2. Introducción.

El calor residual afecta al medio ambiente, propiciando así, el aumento de la temperatura del planeta tierra. Esto afecta sobre todo a los polos, donde se concentra la mayor área de hielo (casquete de hielo), el cual, a causa del aumento de la temperatura mundial, estos se derriten. Los casquetes polares, tienen una función en el planeta tierra, que es la de regulación de temperatura, es decir, su función es bajar la temperatura ambiental para que la vida pueda generarse en la tierra.

El aumento de la temperatura en el planeta, está derritiendo los casquetes de hielo, con lo cual, la temperatura ambiental está subiendo cada año uno o dos grados centígrados. Además, el derretimiento de los casquetes está provocando un aumento del nivel de agua en los océanos, con la consecuencia que el agua que hay en los mares, pueda llegar incluso a deshabitar ciudades cercanas a estos.

Una solución a estos problemas es un motor Stirling, este puede funcionar gracias a un diferencial de calor. ¿Por qué no utilizar un motor Stirling para aprovechar ese calor que afecta al planeta para generar electricidad?

Es preciso hacer un estudio de las soluciones que ofrece el mercado, para decidir las características i funcionalidades que incluirá el diseño final del motor Stirling.

Se tendrán en cuenta los factores que afecten al diseño, como por ejemplo, tipos de materiales para los componentes del motor, un breve análisis de mercado para conocer los tipos de motores, componentes y usos de los mismos, y el método de generación de electricidad del motor con más rendimiento posible.

Teniendo en cuenta el gran abanico de fabricantes de este tipo de motores, se podrá llegar a obtener unas especificaciones técnicas concretas, en función a la localización del motor, es decir, en que ubicación de la universidad se aplicará.

La ubicación del motor se definirá en función a la temperatura y calor residual que se genere en las instalaciones del Tecnocampus. Donde a primera vista, se instalaran en las tuberías del intercambiador de calor del aire acondicionado.

3. Motor Stirling.

3.1. Breve historia

El motor Stirling se inventó en 1816 por Robert Stirling, el cual era cura de la Iglesia de Escocia. El motor Stirling utiliza un ciclo de combustión externa. Este motor es más seguro que un motor de vapor. Ya que un motor Stirling no puede explosionar. Además, se puede destacar también el intercambiador de calor que tiene dicho motor, el cual recupera el calor inutilizado para generar energía. Este estilo de motor utiliza el pistón de potencia y el desplazador de este pistón en el mismo cilindro para obtener una relación compresión

El boom y el declive del motor Stirling en el s.XIX.

La producción del motor Stirling fue impulsada por J. Ericsson un inventor e ingeniero suizo. Triunfo en la manufactura de motores Stirling, vendió alrededor de 2000 motores entre Estados Unidos y Reino Unido, en 1850. En esa época, el motor Stirling era superior a sus coetáneos, de hecho, era el más eficiente. Pero su declive llegó, cuando aparecieron el motor de gasolina y diésel, los cuales son mucho más potentes que el Stirling.

El motor Stirling recuperó importancia en 1940, después que la compañía Philips empezó a desarrollar generador de potencia eléctrica portátil. Finalmente, el generador de potencia portátil no fue realizado, ya que se inventó el transistor de potencia y este necesitaba menos cantidad de potencia.

Los motores Stirling se fueron desarrollando en Europa y Norte América, por otro lado, la investigación de este motor en Japón iba con un retraso de 20 años respecto las potencias occidentales. Este motor también fue utilizado desde 1982 para el proyecto de ir a la luna impulsado por el ministro norteamericano de industria. Varios motores Stirling se desarrollaron durante los seis años que duro el proyecto el motor de potencia de calor solar, los sistemas de aire acondicionado con un motor Stirling etc.

3.2. Principio de funcionamiento

El motor Stirling es un motor de combustión externa, por otra parte, su gas de escape es muy limpio y funciona muy despacio en comparación a los motores de combustión interna. Al ser un motor de combustión interna, más allá del petróleo, puede utilizar toda fuente de calor, puede usar toda fuente de calor, el calor terrestre, el calor de las aguas termales, etc. A partir de dicha característica, los motores Stirling han sido investigados y desarrollados como el motor de la próxima generación, y se esperó que fuese practicable.

En termodinámica, se puede explicar que el motor Stirling es un motor de combustión externa regenerativo usando el ciclo Stirling. El Ciclo Stirling se compone por un proceso de calentamiento a volumen constante, proceso de expansión isotérmico, proceso de enfriamiento a volumen constante, y un proceso de compresión isotérmico. Para la eficiencia de calor de este ciclo, usando calor, que se descarga fuera del motor por enfriamiento a volumen constante y calentamiento a volumen constante, igual a una eficiencia térmica del ciclo Carnot que tiene la eficiencia térmica teóricamente más elevada.

Un motor Stirling generalmente hace ir y volver al gas entre dos diferencias de temperatura del espacio adjunto y hacer que se produzca una variación de presión. Estos dos espacios están perfectamente sellados, luego, no hay intercambio de gases con el exterior. Es capaz de trabajar en cualquier lugar, si hay una diferencia de temperatura, del motor Stirling se esperan grandes y diversas aplicaciones en el futuro.

Las características de motor Stirling son las siguientes:

- diversidad de fuentes de calor

Los motores de combustión interna, como la gasolina o el diésel, solo funcionan con combustible volátil. Por otro lado, los motores Stirling no solo usan este tipo de combustible, también algunos combustibles como el carbón y la madera podrían ser utilizadas como combustible. Además, algunas fuentes de calor no combustibles como el calor geotérmico, el calor de las aguas termales, o incluso el calor que genera el sol se puede utilizar para mover un motor Stirling.

- gas de escape limpio

El motor Stirling es de combustión externa, lo que quiere decir que el combustible se quema fuera de este, y mucho más fácil de controlar los gases que emite al medioambiente. Por esta razón, los gases emitidos por un motor Stirling pueden ser más limpios que los que emiten los motores de combustión interna. Además, el motor Stirling tiene un valor añadido, puede utilizar una fuente de calor que ya exista, y a partir de este, funcionar.

- bajas vibraciones

Un motor de combustión interna, con la variación de presión que ocurre en el motor a causa de la explosión, genera vibraciones y ruidos que no pueden ser evitadas. Por otro lado, en los motores Stirling, la variación de presión es muy suave lo que los hace muy silenciosos.

- gran eficiencia térmica teórica

El ciclo Stirling es igual al ciclo de Carnot, pero este último es más eficiente teóricamente. La expresión de eficiencia del ciclo Carnot es la siguiente:

$$\frac{T_c}{T_h}$$

Donde:

T_c : la temperatura más baja en el ciclo.

T_h : la temperatura más alta del ciclo

Esto significa que a cuanta más diferencia de temperatura, mayor será la eficiencia térmica teórica.

3.2.1. Principio ideal de trabajo del motor Stirling

El gas se expande a medida que se calienta, y se comprime mientras se enfría. Los motores Stirling se mueven mediante el uso de esta característica del gas. Sin embargo, el volumen dentro del motor es constante, y la variación se produce en la presión.

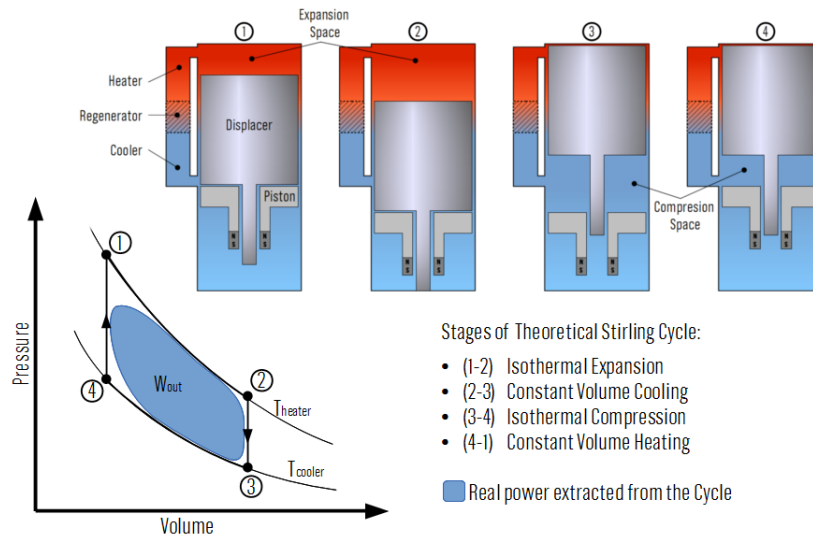


fig. 3. 1. ciclo Stirling. Fuente: JEMSENGINE

2-1: Proceso de compresión isotérmico: el gas se expande con la temperatura constante.

2-3: proceso isocórico: el gas se calienta a volumen constante, con lo cual este se aumenta la presión.

3-4: proceso de expansión isotérmico: el gas se expande a temperatura constante.

1-4: Proceso isocórico: el gas se enfría a volumen constante, con lo cual este se acaba de expandir.

3.3. Estructuras del motor Stirling

Stirling Alpha

El motor Stirling Alfa dispone de dos cilindros. Utiliza uno de ellos que se mantiene caliente mientras el otro se está refrigerando. El ciclo de Stirling tiene cuatro fases: de expansión, de transferencia isocórica del gas, de compresión, y una última de transferencia isocórica del gas. El motor Alfa se compone de dos colocados en V desfasados entre si 90 grados.

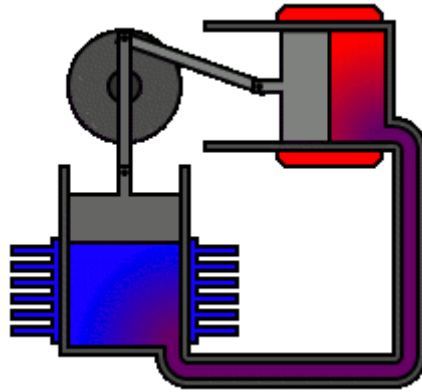


fig. 3. 2. Estructura de motor Stirling tipo alfa. Fuente: Wikipedia

1. Expansión:

El pistón del cilindro refrigerado está situado en su punto muerto superior. Todo el gas está situado en el cilindro recalentado. El gas se expande e impulsa los pistones hacia abajo. En el cilindro caliente por la acción directa de la expansión del gas y en el cilindro refrigerado por la acción indirecta de la transferencia de calor.

2. Transferencia

El pistón del cilindro caliente llega a su punto muerto inferior por la expansión del gas. El gas se transfiere al cilindro refrigerado por la acción que hace el gas al propagarse. Y por la inercia que cede el volante de inercia que continuará moviendo el pistón, hasta su punto muerto inferior, acogiendo todo el volumen posible del gas.

3. Compresión

El pistón del cilindro refrigerado llega su punto muerto inferior obteniendo el máximo volumen de gas. El gas que está dispuesto en el cilindro comienza a ceder calor perdiendo volumen. Esta compresión térmica, succiona más gas del cilindro y pistón caliente, colaborando con el momento de inercia que ejerce el volante de inercia del motor.

4. Transferencia

En este punto el pistón del cilindro caliente llega al punto muerto superior. Al mismo tiempo, el pistón del cilindro refrigerado sube impulsando el gas a través del regenerador hacia el cilindro caliente. Mediante el momento de inercia del motor se irá transfiriendo todo el gas refrigerado al cilindro caliente, dando comienzo de nuevo al ciclo.

Stirling Beta

El motor Stirling beta es mono cilíndrico. El foco frío y caliente comparten el mismo cilindro situado en el extremo del cilindro. Tiene dos pistones diferenciados: un pistón de fuerza y un pistón desplazador que mueve el gas de dentro del cilindro.

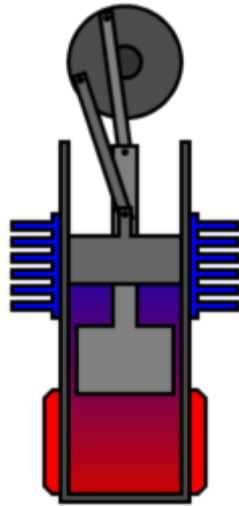


fig. 3. 3. Estructura motor Stirling tipo Beta. Fuente: wikipedia

1. Expansión

El gas es recalentado en el extremo del cilindro, de esta manera impulsa el pistón de fuerza hacia abajo y a la vez al pistón desplazador. Esto permite la total expansión del gas.

2. Transferencia

Mientras el pistón de fuerza se dirige a su punto muerto inferior, el pistón desplazador se mueve hacia arriba. El gas recalentado es transferido a la parte baja del cilindro.

3. Compresión

El pistón de fuerza llega a su punto muerto inferior mientras el pistón desplazador continua inyectando gas a la zona refrigerada del cilindro. El gas comienza a comprimirse succionando al pistón de fuerza hacia arriba.

4. Transferencia

Cuando el pistón desplazador llega a su punto más alto, comienza a bajar desplazando el gas enfriado otra vez a la zona caliente del cilindro. El pistón de fuerza se desplaza ayudando a que el volumen del gas se desplace, cerrando así el ciclo.

Stirling Gamma

El modelo Stirling Gamma es un modelo que es bicilíndrico. Estos dos cilindros están unidos por un pequeño conducto a media del pistón del foco caliente. Es un modelo más compacto, por lo tanto su tamaño es inferior. El Pistón desplazador tiene la función de desplazar el volumen del gas, al mismo tiempo el otro pistón es el que da la fuerza al motor.

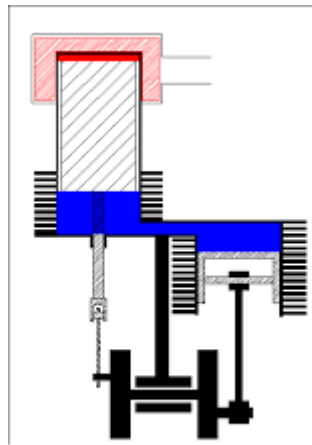


fig. 3. 4. Estructura motor Stirling tipo Gamma. Fuente: wikipedia

1 Expansión

El gas se extiende en el foco caliente, su única vía de escape es el conducto hacia el pistón de fuerza. Este pistón es impulsado hacia abajo gracias a la fuerza que ejerce el gas.

2 Transferencia

El gas continúa expandiéndose y el pistón desplazador avanza hacia su punto muerto superior transfiriendo todo el volumen del gas al pistón de fuerza.

3 Compresión

Cuando el volumen del gas, ya es transferido en su totalidad al cilindro refrigerado, éste se comprime al ceder el calor. El efecto de succión que crea impulsa al pistón de fuerza hacia su punto muerto superior.

4 Transferencia

Cuando el pistón de fuerza llega a su punto muerto superior, el volumen del gas enfriado volviera a transferirse al cilindro caliente, donde volverá a recalentarse y expandirse, inicia otra vez el ciclo.

Motor de pistón libre

La invención del motor Stirling de pistón libre se atribuye generalmente a Beale W.T., que lo construyó en la década de 1960, como una solución para superar los problemas de lubricación con el cigüeñal de un motor tradicional

Los motores Stirling de pistón libre son diferentes porque no tiene cigüeñal y el pistón y el desplazador no están unidos entre sí (es decir, son "libres"). El movimiento del pistón y el desplazador está controlada por las fuerzas del fluido y por lo general por un resorte de algún tipo. La energía se extrae del motor por medio de un alternador lineal, aunque a veces el movimiento del pistón se utiliza directamente en aplicaciones de bombeo. Las ventajas de un motor de pistón libre son menos partes móviles, lo que significa una mayor fiabilidad y simplicidad, lo que también reduce los costes de producción. También pueden ser compacto y ligero en comparación con los diseños más tradicionales. Cojinetes de gas sin contacto y los resortes planos pueden traer la fricción hasta casi cero en estos diseños.

Stirling L.T.D.

El motor Stirling LTD no es una clasificación estricta de los tipos de motor. No existe una definición estricta de lo que constituye un motor LTD pero puede ser tomado como algo que se ejecuta en una diferencia de temperatura de menos de 100 ° C. Cualquier cosa funcionando a este tipo de temperaturas debe utilizar típicamente una fuente de calor distinta, de algún tipo de combustión, que normalmente será a una temperatura de varios cientos de grados.

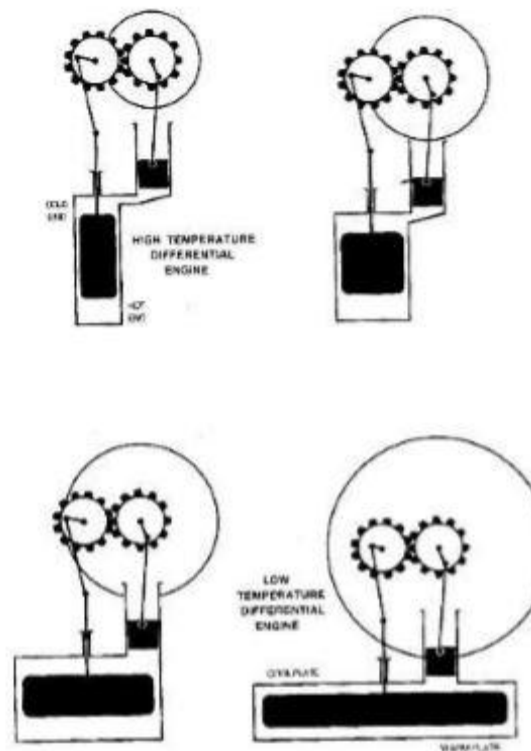


fig. 3. 5. Como afecta la diferencia de temperatura a la geometría. Fuente: *Perry's chemical engineers' handbook*

La Figura anterior proporciona una información útil sobre cómo la diferencia de temperatura afecta a la geometría y las proporciones de un motor Stirling. Con una alta diferencia de temperatura es necesario para mantener una relativa separación entre los extremos caliente y frío con el fin de evitar la pérdida excesiva de calor a través de recorridos cortos de conducción, mientras que la zona de calentamiento y la superficie de enfriamiento es menos crítica. Un motor de LTD, por otro lado, requiere una gran área superficial para la transferencia de calor, para así permitir el calentamiento adecuado y el enfriamiento del gas a temperaturas bajas. También hay menos conducción de calor desde el extremo caliente al extremo frío de modo que la distancia aquí puede ser más corta.

Teoría operacional

Ley de los gases

El principio fundamental del motor Stirling, o de cualquier otro motor de aire caliente, que este se expande cuando se calienta y se comprime cuando es enfriado. Este principio es conocido desde hace miles de años, pero no se entendió hasta que la ciencia de la

termodinámica no se empezó a explorar alrededor del siglo XVII. La ley de Boyle afirmó que si aumenta la presión sobre el gas ideal [1], su volumen disminuye proporcionalmente y viceversa; por lo tanto, el producto de la presión y el volumen se mantuvo constante. Matemáticamente esto se expresa con la siguiente fórmula:

$$p \cdot V = K \quad (1)$$

Benoît Paul Émile Clapeyron elaboró la ley de gas ideal, una ecuación basada en una combinación de otras dos leyes de los gases, la ley de Avogadro y la ley de los gases combinada.

La ley de Avogadro dice que: “Volúmenes iguales de gases ideales, a la misma temperatura y presión, contienen el mismo número de partículas o moléculas.” La ley de los gases combinada se deriva de la ley de Boyle, así como otras dos famosas leyes de los gases: Hay-Lussac y la ley de Charles. Se dice que: “la relación entre la constante de presión, volumen y temperatura de un sistema permanece constante.”

Usando estas leyes y la constante del gas, R , (8,314 J/K·mol) la ley de los gases ideales se puede expresar matemáticamente como:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2)$$

Esta ecuación se puede aplicar a la forma ideal de cualquier gas ideal para describir su comportamiento bajo variaciones de temperatura, presión y volumen. Un gas ideal es una aproximación a un gas real, se trata de un “modo de la materia en la que las moléculas son tratadas como partículas puntuales, no interactúan, las cuales están involucradas en un movimiento aleatorio que obedece a la conservación de la energía. A temperatura y presión estándar, la mayoría de los gases reales se comportan de forma cualitativa como un gas ideal.”[2] Bajo las condiciones experimentales en un motor Stirling, el gas tiene desviaciones, este se expresa a partir del factor de compresibilidad. Este factor aumenta a presión o temperaturas extremas.

Flujo de gas

El número de Reynolds, N_{re} , es un número adimensional que se utiliza para caracterizar el estado de flujo de un fluido. Es independiente del tipo de fluido, sabiendo que a ciertos

números de Reynolds definen un perfil específico de velocidad, si el fluido es aire, helio o nitrógeno [3]. El número de Reynolds se usa para caracterizar diferentes regímenes de flujo, como el laminar o el turbulento: el flujo laminar es para un número de Reynolds bajo, donde las fuerzas viscosas son dominantes, y se caracteriza por el movimiento de fluido suave y constante, mientras que el flujo turbulento ocurre a altos números de Reynolds y es dominado por las fuerzas de inercia, que tienden a producir remolinos al azar, vórtices y otras fluctuaciones [4] del flujo. Se define usando la densidad del fluido en cuestión, la velocidad de la masa, el radio hidráulico, y el coeficiente dinámico de viscosidad.

$$N_{re} = \frac{\rho \cdot u \cdot r_h}{\mu} = \frac{\dot{m} \cdot r_h}{\mu \cdot A_{ff}} \quad (3)$$

Numero de Prandt

El número de Prandt P_r es un número adimensional que se aproxima a la relación de difusividad (viscosidad cinemática) y la difusividad térmica. Se expresa como:

$$N_{pr} = \frac{c_p \cdot \mu}{k_f} \quad (4)$$

Para gases de interés en lo que respecta a un motor Stirling, el número de Prandt es lo suficientemente cercano a 1 por ello puede aproximar esto en la mayoría de las ecuaciones, aunque un valor de 0,7 es más preciso para el aire [5].

El ciclo ideal Stirling

En el siguiente análisis del ciclo Stirling ideal, se puede comprobar los diferentes puntos donde puede haber pérdidas.

- a. la sustancia de trabajo es un gas perfecto
- b. la resistencia del flujo es cero en todo el motor. La presión es uniforme en el motor.
- c. El regenerador (elemento del motor Stirling que tiene la función de recuperar la energía) no tiene pérdidas: el gas entra en el extremo caliente exactamente a la temperatura del calentador y entra al extremo frío exactamente a la temperatura más fría.
- d. Cero pérdidas de calor por conducción, etc: todo el calor que entra al motor pasa al gas.

- e. Expansión y compresión isotérmica: caída de temperatura cero a través de las superficies del intercambiador de calor. En cada punto del motor la temperatura tiene un valor constante.
- f. Los volúmenes de espacio de expansión y de espacio de compresión, varían en la forma discontinua ideal (no sinusoidal).
- g. Se asume una fricción mecánica nula.
- h. Se asume un espacio muerto nulo.

Rendimiento

Para calcular el rendimiento, el motor Stirling primero se debe de saber el trabajo que este realiza durante la expansión y la compresión:

$$w_c = \int_1^2 p \, dv = nRT_c \ln \frac{V_{min}}{V_{max}} \quad (5)$$

$$w_e = \int_3^4 p \, dv = nRT_h \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (6)$$

Además, porque no se consideran pérdidas, el trabajo hecho por cada parte del ciclo es la misma que el calor añadido:

$$w_c = Q_c \quad (7)$$

Y también:

$$w_h = Q_h \quad (8)$$

Y después el trabajo de la red puede ser calculado como la suma de los dos trabajos. El valor de w_c sería negativo debido a la convención de signos.

$$w_{net} = w_c + w_e = nR(T_h - T_c) \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (9)$$

Ahora, la eficiencia total del ciclo se define como la proporción entre el trabajo total de la red de salida y el calor total que entra.

$$\eta = \frac{w_{net}}{Q_e} \quad (10)$$

Substituyendo las ecuaciones 6, 8 y 9 en la ecuación 10:

$$\eta = \frac{nR(T_h - T_c) \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}}{nRT_h \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}} = \frac{(T_h - T_c)}{T_h} \quad (11)$$

Esto demuestra que en un ciclo Stirling ideal, con un regenerador perfecto, es igual a la eficiencia teórica del ciclo de Carnot, η_c .

3. ciclo no ideal Stirling

Por las razones mencionadas en el análisis del ciclo Stirling ideal, el ciclo Stirling real caerá muy por debajo de las expectativas. Hay tres principales contribuyentes no ideales son: una regeneración imperfecta, el movimiento del pistón no sinusoidal, y el volumen del espacio muerto. Estos se analizarán con mayor detalle. El efecto de caída de presión en los intercambiadores de calor, como también los efectos de la pérdida de calor y la fricción mecánica.

El calor absorbido por el regenerador se puede expresar como el producto de la diferencia de temperatura, la masa del gas y el calor específico volumen constante.

$$Q_{r2} = mc_v(T_h + T_c) \quad (12)$$

Si el rendimiento del regenerador, η_{reg} es considerado. El déficit de calor capaz de suministrar de nuevo desde el regenerador, Q_0 , debe ser compensado por el calor suministrado.

$$Q_0 = Q_{r1} + \eta_{reg}Q_{r2} = (1 - \eta_{reg})mc_v(T_h - T_c) \quad (13)$$

La eficiencia global ahora debe permitir la entrada de calor adicional debido al regenerador imperfecto.

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_e + Q_0} = \frac{nR(T_h - T_c) \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}}{nRT_h \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} + (1 - \eta_{reg})mc_v(T_h - T_c)} \quad (14)$$

Que se puede reorganizar para dar la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{\eta_c}{1 + \frac{(1 - \eta_{reg})mc_v(T_h - T_c)}{nRT_h \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}}} \quad (15)$$

Lo cual, teniendo en cuenta que $T_h > T_c$ y $V_{\max} > V_{\min}$, se muestra que la eficiencia global es menor que la eficiencia de Carnot si la eficiencia de regeneración es menor que 1, o desde otro punto de vista matemático.

$$\eta < \eta_c \text{ (for } \eta_{reg} < 1) \text{ and } \eta = \eta_c \text{ (for } \eta_{reg} = 1) \quad (16)$$

Kolin [6] establece que: “debido a las influencias del espacio muerto y el movimiento sinusoidal del pistón, el indicador real (ciclo Stirling p-V y T-s) el diagrama es más redondeado y pequeño de lo que debería ser” esto significa que menos trabajo neto es producido por el ciclo con área cerrada y más pequeña. En la figura X se muestra lo que el movimiento del pistón y el desplazador ideal harían. El movimiento del pistón ideal es casi sinusoidal, teniendo una forma de onda simétrica con el mismo tiempo de inactividad en la parte superior como en la inferior del rango de movimiento. El movimiento del desplazador es algo diferente, y es difícil de cuantificar. Cuando el pistón está en su punto de recorrido más exterior, o BDC, el desplazador debe moverse a través de su rango de movimiento para desplazar todo el gas para el espacio de compresión en el momento en el que el pistón está en reposo en BDC. A continuación, debe permanecer inmóvil mientras el pistón comprime el gas, antes de mover el gas de nuevo, en el espacio de expansión, el pistón toma un tiempo de pausa en el PMS para a continuación, volver a BDC.

El volumen del espacio muerto, V_s , se define como el volumen de gas que no toma parte en el ciclo. Es el volumen de todo el “espacio libre” en el regenerador, intercambiadores de calor y espacios libres de los conductos de interconexión. El efecto del volumen del espacio muerto es disminuir el trabajo realizado por el ciclo en proporción lineal con el porcentaje de volumen muerto en el ciclo [7]. Con este fin, es útil para definir una relación de espacio muerto, δ :

$$\delta = \frac{V_d}{V_{sw}} \quad (17)$$

Donde V_d es el volumen total del espacio muerto en el motor y V_{sw} es el volumen de barrido total del motor, es decir, el volumen de gas de barrido por el desplazador. La relación de espacio muerto puede ser usada para encontrar el factor de Schmidt, F_s , que predice la reducción de potencia en comparación con la situación ideal del espacio muerto. El Factor Schmidt es equivalente a la relación del área real que se puede ver en el diagrama p-V ideal,

en otras palabras, la zona del ovalo del diagrama p-V en la figura 3.6 dividida por el área del trapecio. El Factor Schmidt está dado por la siguiente formula empírica:

$$F_s = 0,74 - 0,68\delta \quad (18)$$

Multiplicando el factor de Schmidt con los cálculos de la potencia en la situación ideal, le dará una buena estimación de la potencia real producida [8]. El factor de 0,74 proviene de la reducción en el área asociada con el movimiento sinusoidal. Si se emplea el movimiento discontinuo este factor se puede aumentar hacia la unidad en su caso por el grado de discontinuidad introducido.

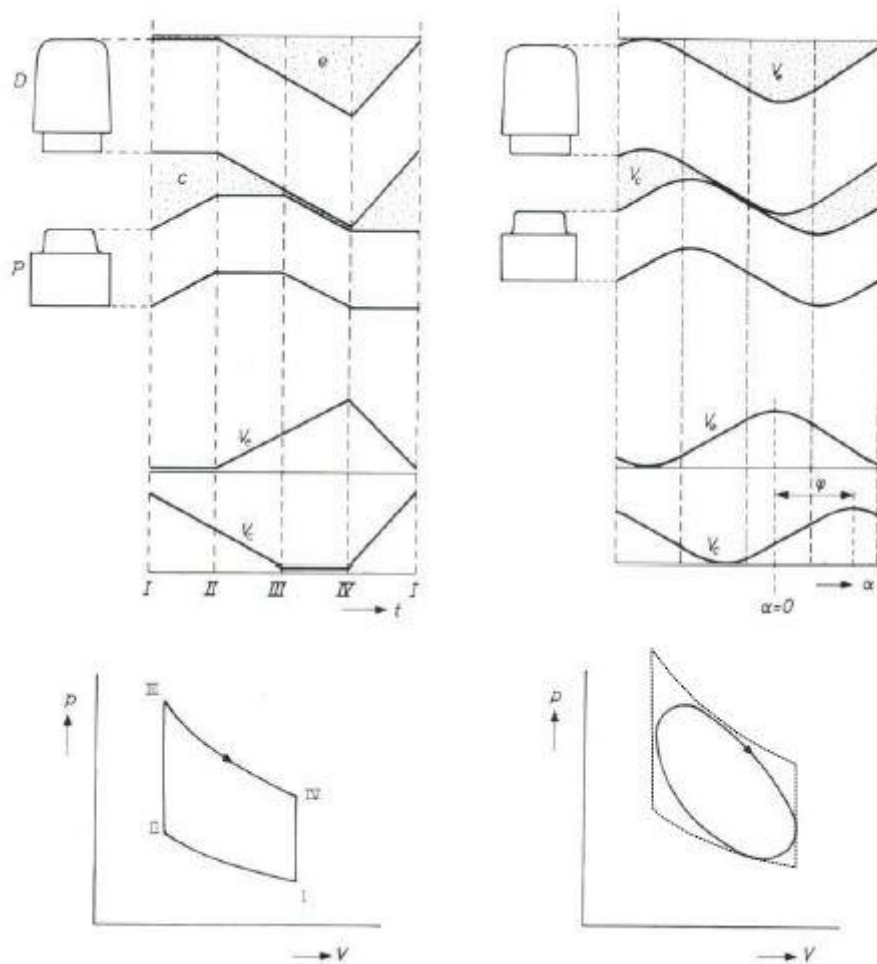


fig. 3. 6. Movimiento del pistón y el desplazador, discontinuo a la izquierda y continuo a la derecha y el resultado diagramas p-V. Fuente: *The Philips Stirling Engine*

Pérdidas

Debido a las pérdidas asociadas a las condiciones del mundo real, en comparación con situaciones ideales que se utilizan con fines analíticos, es imposible, que un motor Stirling a la práctica pueda alcanzar la eficacia del ciclo de Carnot. El factor principal es la regeneración imperfecta que tiene y se discute anteriormente, pero además de esto, hay varias otras formas de pérdidas que contribuyen a la reducción de la eficiencia general.

Pérdidas de caudal

Las pérdidas de flujo, o perdidas de bombeo, son causadas por la resistencia del flujo a través del calentador, enfriador y regenerador. Esto se puede encontrar utilizando la caída de presión en el regenerador, Δp , [9], que se calcula a partir de:

$$\Delta p = \frac{\dot{m}_0^2 C_w L_{reg}}{2r_h \rho} \quad (19)$$

Donde C_w es un factor de fricción, que es una función del número de Reynolds. Su valor puede ser estimado usando la tabla de los valores experimentales, en esta se encuentran el número de Reynolds y la porosidad. L_{reg} es la longitud del regenerador en la misma dirección de flujo y R_h es el radio hidráulico, igual al diámetro hidráulico $d_h/4$.

Después de encontrar la pérdida de presión, la pérdida de potencia viene dada por:

$$P_{per} = 2'n_s \Delta p V_e \quad (20)$$

Donde n_s es la velocidad del motor en Hz y V_e es el espacio de volumen expandido.

Pérdidas de fricción

Las pérdidas de fricción son causadas por todos los puntos de contacto que hay en el motor, estos son: rodamientos; sellos y anillos de pistón. El cálculo de las pérdidas por fricción es muy difícil y el único medio realmente fiable es medirlas.

Pérdidas de calor

Las pérdidas de calor son pérdidas que se traducirán en que deberá haber calor adicional que necesitará ser añadido para mantener la misma salida. Estas son de las siguientes categorías:

Pérdida de traslado

La pérdida de traslado es causada por el desplazador, que se mueve a través de un gradiente de temperatura, de manera que absorbe el calor cuando está ocupando el espacio caliente y pierde el calor en el espacio frío, en el otro extremo del ciclo. Es difícil calcular la pérdida real, pero la lógica y la intuición servirá para entender el concepto; pérdidas serán reducidas a través de un aumento de la holgura entre el desplazador y el cilindro, o un desplazador más largo (que funciona con un gradiente de temperatura más pequeño), o por medio de una reducción del diámetro del cilindro o el uso de un gas menos conductor.

Conducción de calor

Esto incluye todos los recorridos de la conducción del calor en el motor, entre los espacios fríos y calientes. El calor es conducido principalmente a través del material sólido, conductor térmico, es decir, un metal, pero también a través de la conducción de gas. Estos caminos difieren entre los diseños de motores, y son mayores en los motores más pequeños, en donde los recorridos de conducción son más cortos. El calor también se lleva a cabo fuera del espacio caliente, no solo para el espacio frío, pero al disipador ambiente (entorno exterior del motor). De nuevo, la lógica mostrara que la conducción de calor es proporcional a la diferencia de temperatura y conductividad, e inversamente proporcional a la longitud del camino de conducción.

Ventajas y desventajas del motor Stirling

Ventajas

- Alta eficiencia potencial (límite de Carnot). En la práctica los mejores motores Stirling pueden tener eficiencias de 40% o más. Del registro de entrada de calor a la salida de energía eléctrica se lleva a cabo por Stirling Energy Systems para uno de sus motores Stirling de placas solares, al 31,25% de la energía solar convertida a nivel de red eléctrica [9].

- Capacidad para ejecutar en uno o en varias fuentes de calor. Esto es ventajoso en varios aspectos -significa que los motores utilizados en aplicaciones tales como la generación de energía solar todavía pueden producir electricidad incluso cuando el sol no brilla si son alimentados con calor de una fuente alternativa. Esto significa más ingresos generados por la planta en un periodo de recuperación dado el tiempo y la reducción de los operadores. La capacidad de cambiar los combustibles sin alterar el motor también significa que los operadores de los motores Stirling son menos vulnerables a los aumentos en los precios del combustible o la escasez de combustible.
- Operación reversible - si el eje de un motor de Stirling es accionado con un motor, a continuación, el motor Stirling puede ser utilizado como una bomba de calor, cambiando de calor desde el lado frío al lado caliente. Es posible alcanzar temperaturas extremadamente bajas, al hacer esto hay un gran número de exitosos Stirling crio-refrigeradores.
- Emisiones más limpias, incluso si la quema es de combustibles fósiles para el calor. Esto se debe a la combustión es externa al motor, lo que significa que puede tener lugar en condiciones óptimas de combustión, mientras que un motor de combustión interna se quema el combustible de forma discontinua, que es menos eficiente.
- El funcionamiento silencioso debido a cualquier combustión que tiene lugar externamente al motor.
- Bajas vibraciones debido a los diseños fáciles de equilibrar y bajas velocidades de operación.
- Bajo mantenimiento. Hay menos piezas móviles que un motor de combustión interna. Además giran a menos velocidad y tienen menos vibraciones que un motor de combustión interna.
- Entrega de par Smooth – como se ilustra en la figura 3.6 el par instantáneo disponible en un motor Stirling de 4 cilindros varia solo ligeramente en comparación a un motor de combustión interna.

Desventajas

- Coste, el motor Stirling no se fabrica a gran escala, por lo que, fabricar uno cuesta mucho. Una gran parte del costo de cualquier motor Stirling viene de los

intercambiadores de calor, que deben utilizar materiales caros, con el fin de transferir el calor necesario sin corrosión o deformación con el tiempo bajo calor y presión.

- Tienen una mala respuesta al acelerador, estos motores solo funcionan en un rango de velocidades muy baja, y esto es debido a que el aumento de velocidad sea proporcional al calor que hay que aplicarle. Esto hace que los motores Stirling automáticamente no puedan ser utilizados como motores en automóviles, pero si funcionan bien en sistemas eléctricos/híbridos.
- El tiempo de arranque es largo en frío. Se necesita tiempo para conseguir que el calentador alcance la temperatura de funcionamiento, además el motor no alcanzará la potencia máxima hasta pasados unos minutos después del arranque.
- Normalmente no arranca automáticamente, es decir, necesita de una pequeña ayuda para iniciar el ciclo. Esto no se considera del todo como una desventaja, ya que los motores de combustión interna también necesitan de su motor de arranque, pero este sistema aun añade más costes al motor Stirling.
- Para diseñar un motor Stirling con la misma potencia que uno de combustión interna, se tiene que hacer muy grande y pesado. Esto añade coste adicional al total del motor.

Generador Eléctrico:

Las dinamos se utilizan para generar electricidad a partir de energía mecánica, es decir, mediante el movimiento giratorio del motor Stirling se genera energía eléctrica. El funcionamiento y el voltaje de estas dependen de la velocidad de giro, cuantas más revoluciones por minuto mayor voltaje de salida.

Una dinamo se utiliza para generar electricidad a partir de energía mecánica, es decir, mediante el movimiento giratorio del motor Stirling. Se precisa de una tensión de salida de 5V con corriente continua, para poder cargar móviles, tabletas, y dispositivos que los estudiantes tengan a su alcance.

El funcionamiento y el voltaje de salida dependen de la velocidad de giro del motor, es decir, cuantas más revoluciones por minuto gire, mayor será la generación de electricidad. Siempre hay que tener en cuenta la tensión máxima de salida del generador, que puede ser 5, 12, 24V, etc.

Con lo cual, se precisa de un generador que genere más de 5V con menos de 1000rpm, por lo tanto, con la información recogida del funcionamiento de los motores Stirling LTD, con una diferencia de temperatura inferior a 50°C, este tipo de motores suelen girar a un máximo de 150rpm y un mínimo de 50.

Hay variedad de dispositivos para la generación de electricidad, desde una dinamo a un alternador. Dentro de esta gama de posibilidades se encuentran los motores eléctricos de corriente continua, que se pueden utilizar como dinamo.

Un motor de corriente continua es en sí mismo un generador de electricidad. Todo lo que hay que hacer es girar el eje con algún tipo de fuente externa de energía, en este caso será el motor Stirling.

Habrá que convertir el flujo catódico del motor de corriente continua en una corriente que se pueda utilizar. Por lo tanto, se utilizarán unas baterías que harán funcionar los dispositivos unidos y que el flujo de electricidad del generador las cargue.

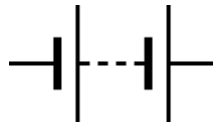


fig. 3. 7. Simbología de Batería

Habrá que conectarle un rectificador de un alternador de coche por ejemplo, para asegurarse que la corriente que genere el motor no cambia de dirección y no se use esta electricidad para mover el motor. El rectificador irá entre la batería y el generador/motor para que el flujo solo vaya en dirección a las baterías y las pueda cargar.

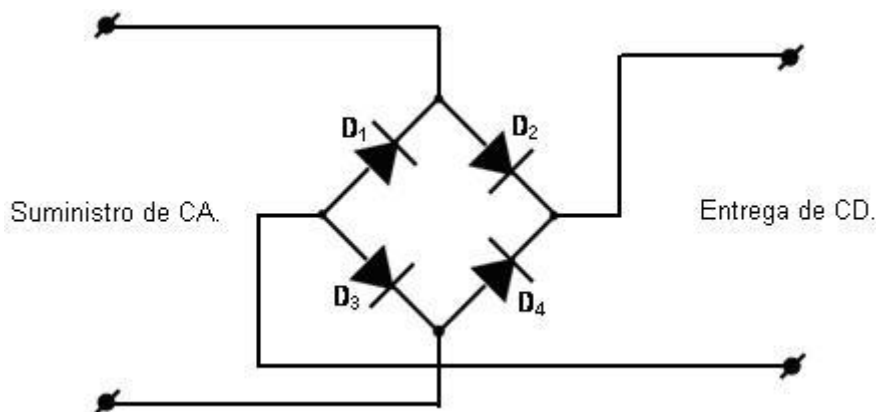


fig. 3. 8. Simbología puente de diodos

Para finalizar, en el circuito se añadirá un transformador que servirá para convertir la potencia a una compatible con los dispositivos que se quieren conectar. Se observa la tensión de la batería, y a raíz de ahí, se hará la selección del transformador necesario. La tensión de entrada del transformador será la de las baterías, y la tensión de salida de este, será la tensión a la que se carguen los dispositivos conector.

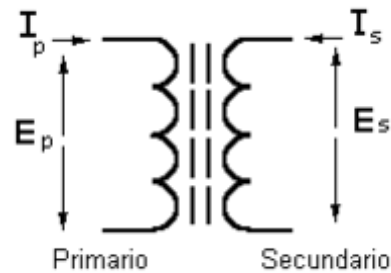


fig. 3. 9. Simbología de un transformador.

Calor residual:

El calor residual que hay en el Tecnocampus, se puede comprobar gracias a los planos de las tuberías de agua caliente sanitaria y de climatización. A partir de aquí se podrá comprobar las temperaturas en estas tuberías y en consecuencia encontrar las que más temperatura expulsan.

De esta manera ya que se utilizará un motor Stirling de bajo diferencial de temperatura, cuanto más diferencial de temperaturas se pueda encontrar, mejor rendimiento tendrá el motor.

El calor residual que se utilizará será el de las tuberías de agua caliente del aire acondicionado, poniendo la siguiente situación: estas tuberías tienen una temperatura aproximada de 70°C , y la temperatura ambiente dentro de la universidad es de 23°C , esto nos proporciona una diferencia térmica de 47°C .

Estas fuentes de calor residual se encuentran en el falso techo de la primera y la segunda planta. La instalación de aire acondicionado consta de nueve máquinas para la climatización de la universidad.

4. Especificaciones técnicas.

El principal objetivo de este proyecto es conseguir un diseño que incluya un motor Stirling para generar electricidad y con este poder cargar dispositivos móviles.

Los objetivos específicos del proyecto y las especificaciones técnicas asociadas son las siguientes:

El primer objetivo es reducir el calor residual para proteger el medio ambiente

- Reconvertir el calor residual en electricidad
- Hacerlo sin disminuir la eficacia del sistema instalado en la universidad
- Cumplir con la normativa
- La instalación final se tiene que situar en un sitio accesible para los alumnos y trabajadores de la universidad
- Elección del motor Stirling
 - El motor Stirling se instalara en una tubería de ACS.
 - Este motor funcionará con la energía disponible en la universidad, el calor residual proporcionará un diferencial de temperatura cercano a 50°C.
 - El motor tendrá que girar a unas 180rpm.
- Generación de electricidad.
 - Generación de 5V a 2A para cargar dispositivos móviles
 - Conexión USB, la Standard para la mayoría de dispositivos.
 - Dinamo para generar esta electricidad, con la velocidad de giro del motor.
 - Reductores de velocidad y par (si es necesario).
- Acoplamiento cable USB a la dinamo para cargar móvil y tabletas.
 - Cable USB: hembra, para conectar los periféricos y cargarlos. Con una longitud de 2 metros, con carcasas de plástico inyectado, conector USB hembra de 6 pines, cables de doble apantallado.

5. Estudio de mercado.

5.1. Generación de electricidad

Para establecer la elección del motor en base al consumo de energía eléctrica establecida, se debe calcular la potencia necesaria para cargar los dispositivos móviles. En este caso, se opta por ver que tensión y que corriente necesitan estos dispositivos para cargarse. Estos datos se pueden obtener a partir de las especificaciones del cargador de los mismos, donde podemos comprobar que el valor de tensión de salida del mismo es de 5V y el de corriente es de 2A.

Gracias a la ley de ohm se calcula la potencia necesaria para alimentar un dispositivo. Esta ley contempla como la tensión (V) es igual a la corriente (I) multiplicada por la resistencia eléctrica (R): $V=I \cdot R$, también establece el cálculo de la potencia de donde sale que: la potencia (P) es igual a la tensión (V) elevada al cuadrado dividida entre la resistencia (R): $P=V^2/R$.

De la formula donde se contempla la tensión, se despeja la resistencia R, y se sustituye en la ecuación de potencia eléctrica quedando la siguiente ecuación:

$$P = V \cdot I \quad (21)$$

Con lo cual se conoce la potencia nominal que se necesitará para efectuar la carga de las baterías de los dispositivos. La cual será: $P=5 \cdot 2=10W$, que será el objetivo de generación de electricidad.

En este punto es necesario encontrar un generador en el mercado el cual permita conocer las revoluciones por minuto que necesitaremos posteriormente en el motor Stirling, o por el contrario utilizar un reductor con un escalado suficiente para llegar a estas revoluciones.

Inspeccionando el mercado de generadores de electricidad, se observa que hay varios tipos de generadores: alternadores, dinamos y motores eléctricos tipo slot (motores de scalextric comúnmente dichos).

Los alternadores quedan descartados automáticamente por el simple hecho de que tienen demasiada fricción lo que para este tipo de proyecto es un gran problema, ya que, el motor

Stirling no es muy conocido por tener un gran par. Esto puede ocasionar que el motor a causa de estar conectado con el alternador, no funcione.

La dinamo también queda descartada por las fricciones que genera, y puede por el mismo motivo que el alternador, ocasionar que el motor no funcione. Por contrapartida a esto, se puede decir que las dinamos generan corriente continua, y es más barato.

Por último encontramos los motores slot, estos tienen muy bajas fricciones, tiene un par de 340g·cm, con lo cual el par del motor Stirling podrá mover su eje sin apenas pérdidas, por el contrario se encuentra que en estos motores eléctricos se necesitan muchas revoluciones, alrededor de unas 2000/2500rpm, para que llegue al voltaje nominal.

Para este proyecto se ha desmontado un coche de scalextric y se ha extraído el motor eléctrico. Mirándolo bien, no aparece ninguna información sobre el voltaje, revoluciones por minuto, ni corriente. Pero si se sabe con certeza, que si este motor es utilizado invirtiendo su polaridad, se puede generar electricidad con él.



fig. 5. 1. Motor Slot

La “lenteja” que se puede ver en la figura anterior, es un condensador, este motor genera muchas chispas dentro del motor, generando así cortocircuitos, con lo cual, el condensador absorberá estos cortocircuitos o cambios bruscos de la tensión.

En este caso, este motor probado en una bancada, en alrededor de unas 1500/1700rpm son capaces de generar una tensión de 9V y una corriente de 1,17 A, es decir, alrededor de 10W justificando así el uso de este motor en concreto. El par motor de este tipo de motores es de 170gr·cm, este par se pasa al sistema internacional (Nm).

$$170gr \cdot cm \cdot \frac{0,01m}{1cm} \cdot \frac{0,001kg}{1gr} \cdot \frac{9,81Nm}{1kgm} = 0.0167Nm$$

5.2. Elección del motor Stirling

A partir de este punto, donde ya se ha obtenido las revoluciones por minuto necesarias para la carga de estos dispositivos. Se conoce el incremento de la temperatura que se obtiene del calor residual. Con esta temperatura y las revoluciones necesarias para la generación de electricidad, se elaborará un estudio de mercado para valorar las distintas opciones de motores Stirling.

Primero se ha de tener en cuenta el rango de temperaturas (de 21 a 70°C) en el cual debe moverse el motor. Este definirá y reducirá significativamente las posibilidades que hay en el mercado. El segundo criterio para la elección del motor serían las revoluciones. Estas deberán ser altas (1500rpm). Aunque no es necesario obtener un motor con esta última prestación, no sería algo grave, porque mecánicamente existen reductores, e incluso juegos de poleas para aumentar las revoluciones (no del motor Stirling sino del generador).

A continuación se explicarán diferentes tipos de motores Stirling con sus especificaciones técnicas y al final se hará una comparación entre ellos para conocer el modelo más óptimo para el proyecto.

5.2.1. Tipos básicos del motor Stirling

- Motor Stirling tipo alfa

El motor Stirling tipo alfa es un motor que funciona con una temperatura de unos 500°C, y es capaz de rodar aproximadamente entre unas 1000-1500rpm. Este tipo de motores necesitan una fuente de calor potente, es decir, una llama. Este motor consta de un pistón y un desplazador, estos tienen una configuración a 90°. Se pueden conseguir con unas dimensiones relativamente pequeñas. El precio ronda los 50€.

Los requisitos para este proyecto son las revoluciones, que no son un gran problema que se ha comentado anteriormente, y la temperatura, que en este caso, no hay manera alguna de conseguirla.

Este motor consta de un pistón y un desplazador, estos tienen una configuración a 90°.

Este modelo de motores, serviría sobre todo para industrias donde se utilicen grandes hornos, y hubiese un desaprovechamiento de calor residual muy importante. Por ejemplo en las industrias siderúrgicas, incineradoras de residuos, etc.



fig. 5. 2. Motor Stirling tipo alfa. Fuente: www.ebay.com

- Motor Stirling tipo Gamma

Este modelo se compone de dos pistones dispuestos en paralelo. Este modelo de motor, como el anterior, también necesita de la combustión, con el fin de llegar a las temperaturas mínimas de arranque del mismo. Estas son aproximadamente de unos 300°C, y puede rotar a una velocidad de 2000rpm. Se pueden conseguir con unas dimensiones relativamente pequeñas. El precio ronda los 110€.

Por los motivos del tipo de motor anterior (alfa), la fuente de calor que se puede generar o en este caso, sobra en el Tecnocampus, no es suficiente para mantener, y ni siquiera arrancar el motor.

Con respecto a la velocidad de giro, es una velocidad idónea para el generador, este puede conseguir un movimiento de su eje a una velocidad suficiente como para generar la potencia necesaria, e incluso más, para la carga de cualquier dispositivo móvil.

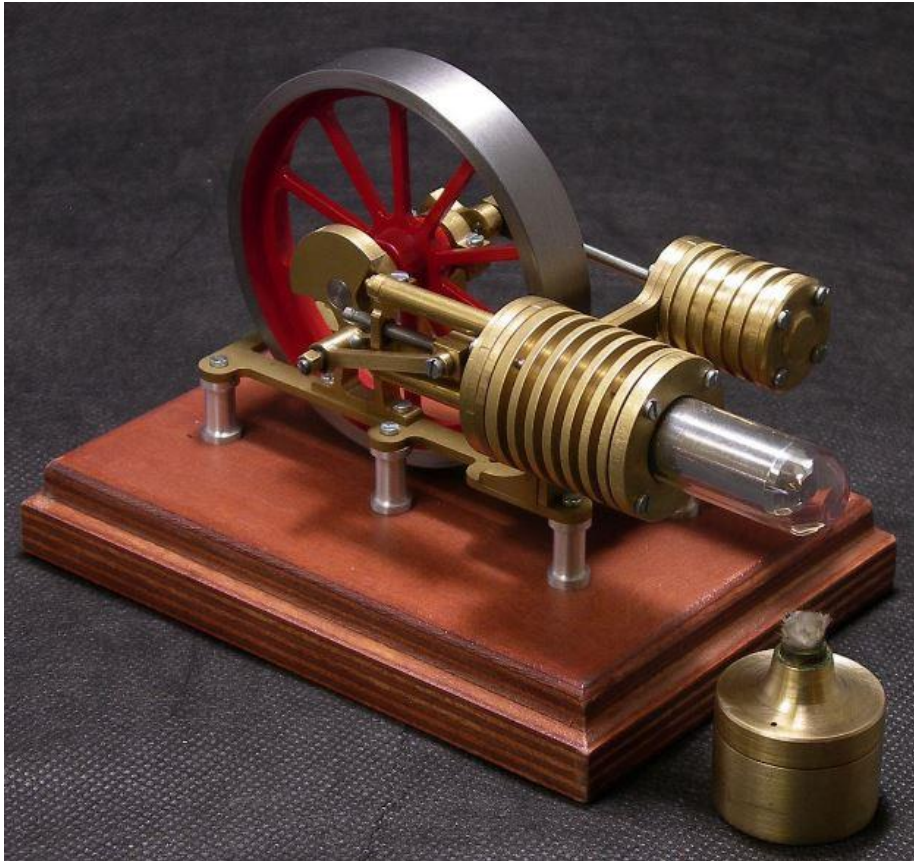


fig. 5. 3. motor Stirling tipo Gamma. Fuente: www.ebay.com

- Motor Stirling tipo Beta

Este tipo de motores tienen una característica diferente a los demás, solo tienen un cilindro, y en este tiene los dos pistones como se muestra en la siguiente figura X. Tiene la particularidad que el desplazador se mueve a causa del gas calentado por el foco de calor en la esquina izquierda y el pistón de potencia desplaza el aire menos caliente para que el desplazador vuelva al principio. Se observa como la configuración de este motor consta de dos pistones a 0° entre sí. Se pueden conseguir con unas dimensiones relativamente pequeñas. El coste es medio es de 90€.

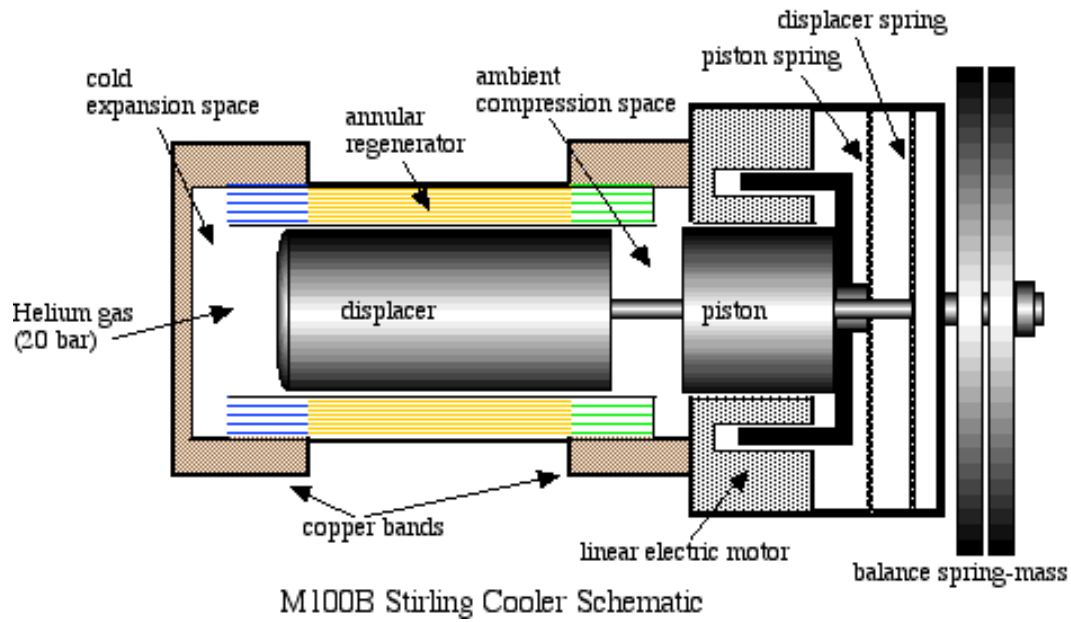


fig. 5. 4. Esquema del funcionamiento del tipo beta. Fuente: www.ohio.edu

En relación a los criterios necesarios para que este pueda ser el motor elegido del proyecto se puede comentar que la temperatura que necesita el Beta para arrancar es de 450°C aproximadamente. Y en cuanto a revoluciones se mueve entre unas 2000rpm.

Lo mismo que en los dos modelos anteriores, en cuanto a la velocidad de giro, este motor es idóneo para el sistema que se quiere desarrollar, el problema viene cuando se quiere arrancar el motor. Este no arrancará con las temperaturas que se obtienen en la universidad.

En la siguiente figura X se puede observar como este tipo de motores tienen un disipador de calor, en el modelo Beta es estrictamente necesario tener una buena refrigeración en la base del cilindro, ya que, al solo haber un cilindro, este con el calor que proporcione la fuente, lo puede calentar entero y provocar que no funcione.

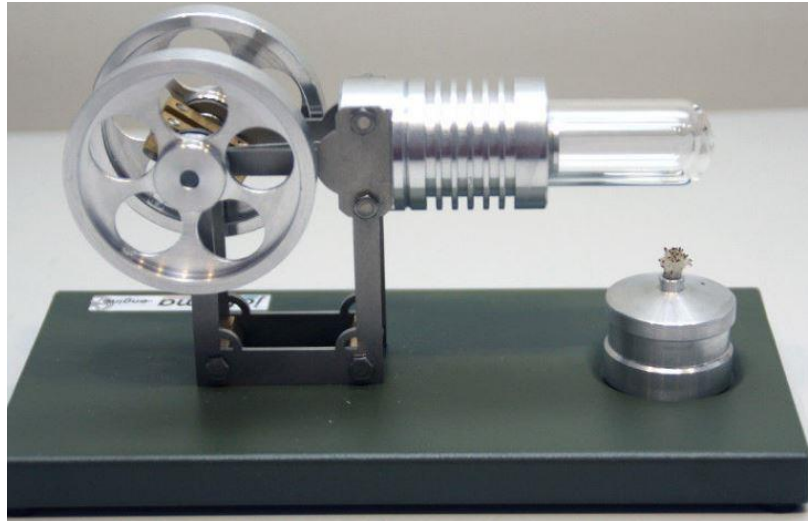


fig. 5. 5. Motor Stirling tipo beta. Fuente: www.ebay.com

Como se ha podido comprobar, el mercado de los motores Stirling es bastante escueto, no hay mucha variedad donde elegir. Solo se ha encontrado un fabricante que produzca este tipo de motores en serie (boehm Stirling). Los equipos que más importancia tienen en el mercado son los que se utilizan en aplicaciones solares, y en compresores de aire o motores de gasolina para agricultura.

5.2.2. Tipos de motor Stirling especiales

- Boehm Stirling (HB7):

Los boehm Stirling tienen un gran acabado, y unas dimensiones reducidas. Existen modelos de 1 hasta 4 cilindros en paralelo. Se pueden conseguir con unas dimensiones relativamente pequeñas. Los motores de boehm Stirling son los más caros sin duda, ya que son de alta precisión y de una calidad exageradamente alta, los mejores del mercado, su precio es de 195€.

Este modelo es capaz de trabajar a más de 2000rpm en función de la distancia y del tamaño de la llama, con lo cual, se podría generar electricidad perfectamente. Este motor podría ser una buena opción, pero teniendo en cuenta el diferencial de temperatura con el que se cuenta pero no es útil ya que con este no funcionaría.

En este tipo de motores no haría falta el uso de reductores o cualquier tipo de mecanismo mecánico ya sea por poleas o por engranajes para aumentar las revoluciones en el generador. Este modelo tiene las suficientes revoluciones como para generar la potencia necesaria.

Este tipo de motores funcionan con un diferencial de temperatura de unos 700°C, este hecho hace que no sea apto para este proyecto, directamente queda descartado ya que el diferencial de temperatura de nuestro sistema es de 50°C.



fig. 5. 6. Motor Stirling hb7. Fuente: www.boehmstirling.com

- Pasco: delta T

Pasco es una empresa dedicada al material para la enseñanza. Esta empresa tiene diversos motores Stirling, con diferentes variantes y aplicaciones para poder hacer demostraciones físicas en una clase práctica. De entre ellos existe este modelo, que a su vez se pueden conseguir con las dimensiones más pequeñas del mercado. El precio ronda los 40€.

El delta T, es el tipo de motor que necesita este proyecto en cuanto a temperaturas. El problema son las revoluciones que alcanza, que son pocas (de 70rpm a 250rpm) en función del foco de calor que se le aplica. En cuanto al diferencial de temperatura de funcionamiento es de unos 4°C.

En este modelo hará falta un reductor de velocidad, o un juego de poleas con un escalado con un mínimo de 24:1.



fig. 5. 7. Motor Stirling LTD. Fuente: www.pasco.com

5.2.1. Comparación de los motores Stirling

Una vez hecho el estudio de mercado y teniendo en cuenta los diferentes tipos de motores Stirling que existen en el mercado, se elabora una tabla con las diferentes especificaciones que más se deben de tener en cuenta a la hora de la elección del motor. Esta tabla tendrá en cuenta la temperatura de funcionamiento, las revoluciones máximas del motor, las dimensiones y el precio.

Esta tabla servirá para poder hacer de manera más objetiva la elección del motor Stirling, y así poder hacer una elección del motor más óptimo para este proyecto y mejorar las prestaciones del sistema de generación de electricidad.

	temperatura (°C)	dimensiones (mm)	velocidad de giro (rpm)	coste (€)
Boehm Stirling (HB7)	700	70x156x108	2000	195
Pasco: delta T	20	102X102X125	250	35
Motor Stirling tipo alfa	500	100x45x50	1500	50
Motor Stirling tipo Gamma	300	140x110x80	2000	110
Motor Stirling tipo Beta	450	180x90x100	2000	90

Tabla 5. 1. Comparativa de especificaciones de motores Stirling

La elección del motor Stirling es sencillo, ya que, el único que cumple con las características necesarias en relación al rango de temperaturas del que se dispone en el Tecnocampus, es el motor Delta T, además es más económico.

6. Diseño y cálculo del sistema.

Para empezar, se analiza teóricamente que tensión de salida hay en el generador. De esta manera se comprueba teóricamente si la tensión de salida es suficiente como para cargar un dispositivo móvil.

Posteriormente También hay que tener en cuenta la estructura donde se aloja el generador. Se harán los cálculos para la estructura de este y se simularán en SolidWorks. Como también la ubicación de esta en el motor Stirling.

Por último, se hacen los cálculos de poleas, donde se debe tener en cuenta la posición del generador, para poder conocer la distancia entre centros, la longitud de la correa y el factor de transmisión. Los cálculos para determinar las dimensiones de las poleas para aumentar la velocidad de giro del generador, en este caso, el giro del motor Stirling, que es de 150rpm en el peor de los casos, aumentarlo hasta 2000rpm en el generador.

6.1. Diseño del sistema.

Para comenzar, primero se explica cómo va a ser el sistema y que elementos lo van a constituir. El sistema de generación de electricidad a partir de un motor Stirling de baja temperatura, funciona a partir de un generador conectado al eje rotante del motor. Este eje, gira y hace girar al generador generando así la corriente.

Por otra parte, este sistema lo constituirán los siguientes elementos: un motor Stirling de baja temperatura, un generador, una o dos poleas y cables. Cada uno de estos elementos tiene su función dentro del sistema.

- El motor Stirling de baja temperatura, se encargará de aprovechar el calor residual del Tecnocampus (figura 6.1) y transformarlo en un movimiento giratorio de 250rpm como máximo. Se estima que este gire a 150rpm con una diferencia térmica media de 40°C.

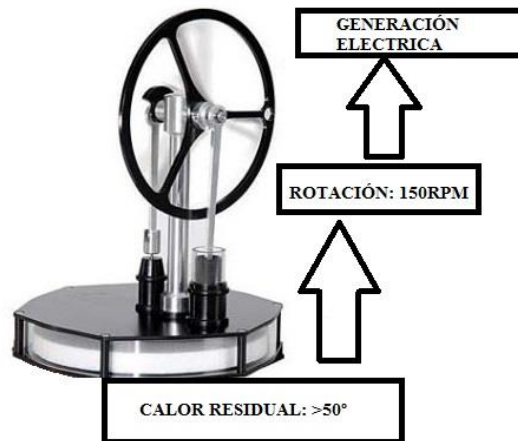


fig. 6. 1. Explicación del sistema.

- El juego de poleas se encargará de aumentar la velocidad de giro del generador, para que el este, que tiene una potencia de salida de 10W a 2000rpm, pueda cumplir las especificaciones (figura 6.2.).
- El generador, gracias a las poleas, rodará a 2000rpm y generará lo necesario para cargar dispositivos móviles (figura 6.2).

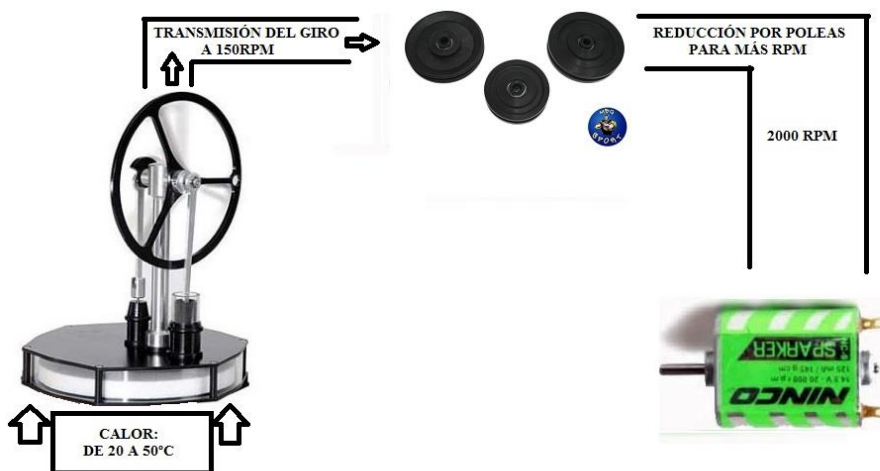


fig. 6. 2. Esquema de elementos de reducción

- Los cables se conectan al generador para aprovechar la electricidad generada por el generador y poder encender luces de bajo consumo o cargar dispositivos móviles (figura 6.3.).



fig. 6. 3. Sistema de recarga de baterías.

Datos necesarios para los cálculos:

- Las revoluciones del motor Stirling. Para calcular la fuerza aplicada en la estructura, que se ha diseñado para la generación de electricidad y el cálculo de poleas. En el caso de la estructura se eligen las revoluciones máximas (250rpm) y para la generación de electricidad, las revoluciones mínimas (150rpm). Siempre escogiendo el peor de los casos para ambas aplicaciones para asegurar que todo funcione correctamente.
- Potencia del motor, necesaria y fundamental para el cálculo del par, este es necesario para calcular el par motor, y averiguar si este supera al par del generador. El motor Stirling utilizado para este proyecto es de 0,02CV.

6.2. Cálculo de la estructura.

Comenzando por el cálculo de la estructura, primero se debe determinar la ubicación de esta, después las medidas aproximadas que debe tener. Una vez se conoce dónde y “como” será, se deberá calcular las tensiones provocadas por el peso y la fuerza que debe soportar.

El peso que debe soportar, es el peso propio de la madera y el del motor, que es relativamente poco. La fuerza irá en función del par que genere el giro del motor, este dependerá del calor que se le suministre al motor, y el par con el que este gire.

De esta manera tenemos:

$$P_{cv} = \frac{\tau N}{7023,5} \quad (22)$$

La demostración de esta fórmula es a siguiente:

$$\frac{\text{Trabajo}}{\text{Tiempo}} = \frac{F \cdot L}{T} = \frac{M \cdot L \cdot T^{-2} \cdot L}{T} = ML^2T^{-3} = \text{Potencia(W)} \quad (23)$$

De donde se sabe que:

F = Fuerza (N)

L = distancia (m)

T = tiempo (s)

M = masa

N = rpm

τ = Par (Nm)

Para obtener el valor de 7023,5, que es un factor de conversión, se hace de la siguiente manera:

$$\frac{\text{revolucion}}{\text{minuto}} \cdot \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ revolucion}} \cdot \frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ segundos}} = \frac{2\pi}{60} \text{ rad/s} \quad (24)$$

Si: $1cv=735.39875W$

Para obtener la potencia en caballos (CV), hay que hacer un factor de conversión. Este implica pasar de rpm a rad/s y los vatios (W) a caballos (CV)

$$P_{cv} = \tau(Nm) \cdot N(rpm) \cdot \frac{60}{2\pi}(rad/s) \cdot 735,49875(W) = CV \quad (25)$$

Y ahora se calcula el par necesario, sabiendo que la potencia es 0.02 CV sustituyendo en la ecuación 22:

$$\tau = \frac{P_{cv} \cdot 7023,5}{N} = \frac{0.02 \cdot 7023.5}{250} = 0.56Nm$$

El par proporciona información sobre que fuerzas actúan sobre el generador y se puede realizar el cálculo de cómo es la estructura donde va alojado el generador.

La estructura debe ir anclada al motor Stirling, y la fuerza que tiene que aguantar es de 6kg. Con lo cual aprovechando el soporte del cigüeñal, se puede diseñar la estructura para poder acollarla en este.

La zona donde va el generador apoyado, debe tener unos anclajes, para evitar el movimiento rotacional que este pueda tener a causa del par, también tiene que dejar sobresalir el eje del motor, para que se pueda poner la correa de transmisión correspondiente.

Se valoran dos tipos de estructuras, uno que permita unir el eje del motor Stirling con el generador mediante poleas, y otra mediante fricción con el volante de inercia. Mediante poleas se puede observar, como puede cambiar el centro entre ejes según cambie la forma, o el diseño de la estructura. En cambio mediante la fricción con el volante de inercia, el diseño puede cambiar, pero la ubicación del generador siempre será el mismo.

Para el diseño de la estructura, se utiliza el programa SolidWorks, donde se realizan las simulaciones de la estructura. Y se analizan los valores obtenidos por este.

A continuación en la figura X se puede observar la forma de la estructura para el generador, está diseñado en función de las necesidades, es decir distancia entre ejes de las poleas y sobretodo de manera que aguante los esfuerzos que este generador le propone.



fig. 6. 4. Diseño de la estructura.

Una vez hecha la estructura, se procede a hacer las simulaciones pertinentes. En el agujero que se puede observar, que es de 2,5 centímetros, se aplica el par que hace el motor, después la fuerza propia del motor, y el peso propio de la estructura. De esta manera, con SolidWorks se pueden ver las deformaciones y los esfuerzos de Von Mises, y se obtiene información de las zonas con más esfuerzos y que más sufren a raíz de los esfuerzos que se le aplican a la estructura.

En la figura X, se observan los esfuerzos de Von Mises. Se observa que en el agujero, es la zona que más sufre, pero a su vez esta aguanta estos esfuerzos, ya que no son muy elevados.

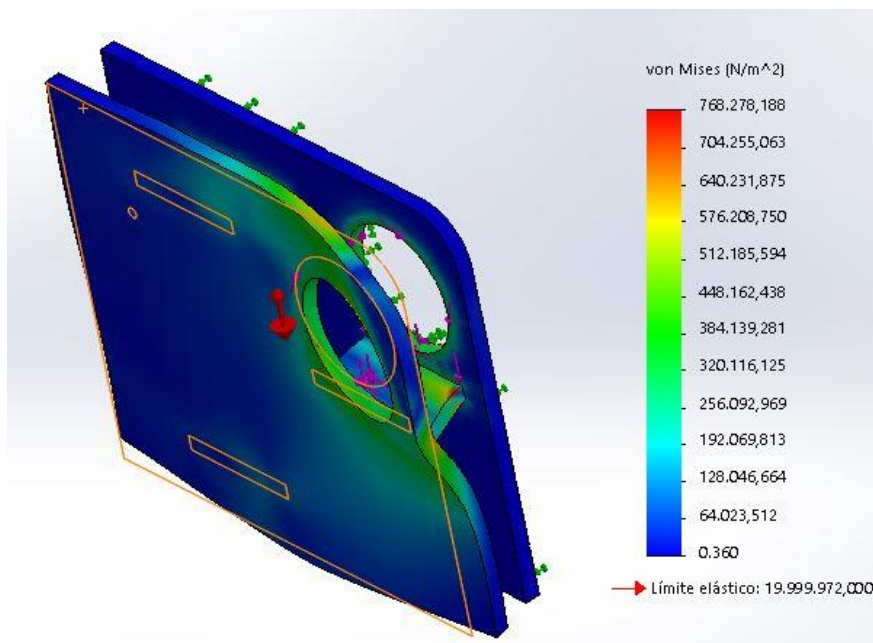


fig. 6. 5. Esfuerzos de Von Mises en la estructura.

Finalmente en la simulación, se puede encontrar tanto el desplazamiento unitario como el desplazamiento real. En la siguiente figura se puede observar el desplazamiento real, y se observa que en las ubicaciones donde hay más desplazamiento, es donde están aplicados los esfuerzos.

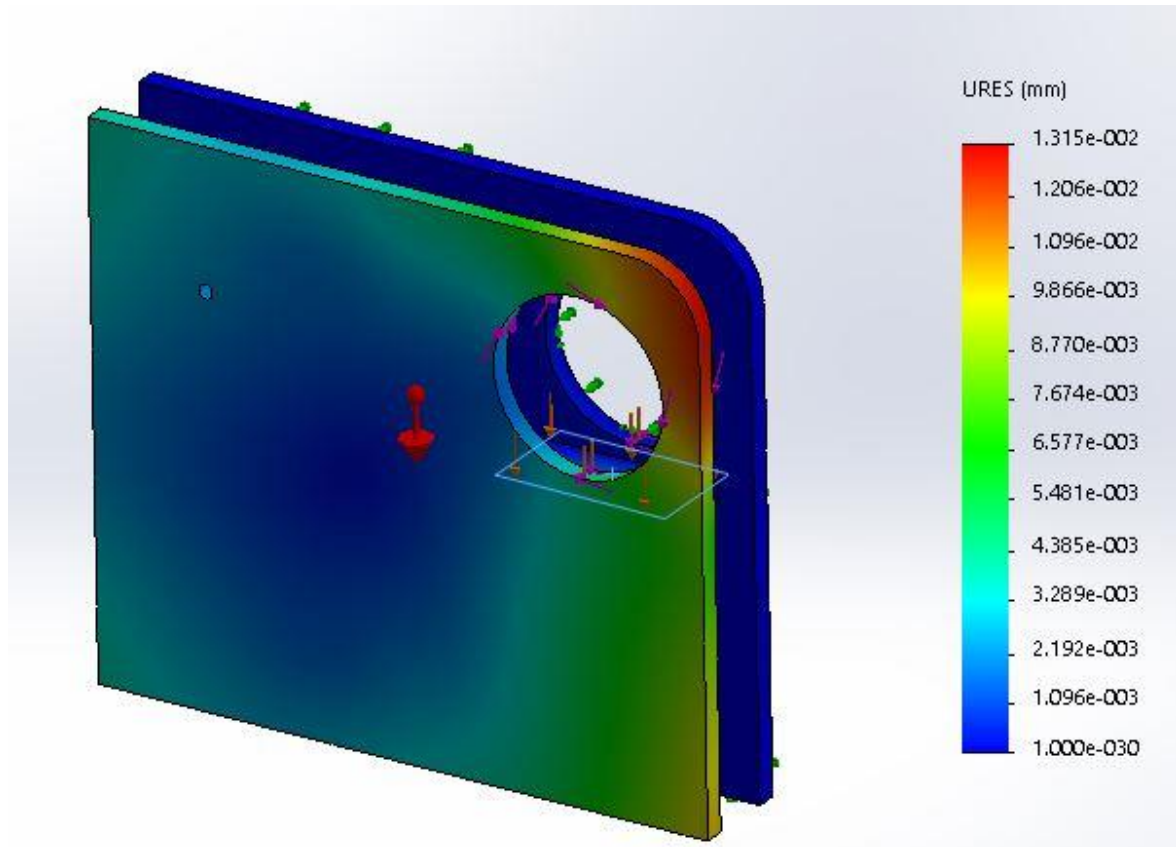


fig. 6. 6. Simulación de la deformación de la estructura

En conclusión esta estructura es suficiente para aguantar los esfuerzos que produce el generador. El material es madera de bálsamo de 3mm de espesor, se procederá a cortar esta estructura en la cortadora laser del Tecnocampus.

6.3. Cálculo de transmisión.

6.3.1. Transmisión por fricción.

En el caso de conectar el generador con el motor Stirling mediante fricción, se tiene en cuenta el diámetro del volante de inercia que son: $9\text{cm}=0.09\text{m}$ y el diámetro del eje del generador (o en caso de llevar algún elemento de fricción, ese diámetro). En este caso, el eje del generador, lleva una rueda de Scalextric con un diámetro de $2\text{cm}=0.02\text{m}$.

Con estos valores se puede aceptar el siguiente factor de transmisión (i), que es la relación entre la velocidad de salida (velocidad que necesita el generador) y la de entrada a la transmisión (generada por el motor Stirling). Para calcular este factor, la velocidad del motor Stirling que se utiliza es la más desfavorable, en este caso 180rpm , y la de salida es la mínima que necesita el generador 2000rpm . En el caso de las revoluciones del motor Stirling, se le puede aplicar un factor de servicio (factor de seguridad) para reducir esta velocidad de giro y así asegurar que funcione correctamente en la práctica.

En este caso el factor de servicio es de 1.5, ya que son las pérdidas por fricción que puede tener el motor Stirling. De esta manera queda lo siguiente:

$$N = \frac{180 \text{ rpm}}{1.5} = 120\text{rpm} \quad (26)$$

Una vez que se ha calculado N con el factor de servicio, se calcula el factor de transmisión (i):

$$i = \frac{\text{rpm (motor Stirling)}}{\text{rpm (generador)}} = \frac{2000\text{rpm}}{120\text{rpm}} = 16.67 \quad (27)$$

Este valor indica la diferencia de radios que tiene que haber con respecto al volante de inercia y el eje del generador o el accesorio que se le incorpore. En el caso que se está calculando se conocen ambos diámetros, con lo cual se puede obtener el factor de transmisión en función de los diámetros:

$$i = \frac{\text{diámetro (motor Stirling)}}{\text{diámetro (generador)}} = \frac{0.09\text{m}}{0.02\text{m}} = 4.5 \quad (28)$$

Se comprueba que en esta hipótesis, el factor de transmisión no coincide, con lo cual se puede pensar que se debe disminuir el diámetro del accesorio que lleva el eje del generador.

Una solución es cambiar el tipo de accesorio, y utilizar uno más fino. El diámetro mínimo se calcula despejando en la ecuación (28) el diámetro del generador, siendo $i = 16.67$ y el diámetro del motor Stirling $0.09m$.

$$\text{diámetro (generador)} = \frac{\text{diámetro (motor Stirling)}}{i} = \frac{0.09m}{16.67} = 0.0054m$$

Con lo cual el eje del generador debe ser igual o más pequeño que $5.4mm$ y debe de ser de un material tipo goma, para que se pueda transmitir el giro.

6.3.2. Transmisión por poleas.

Por otro lado, la transmisión también se puede hacer por poleas, el factor de transmisión (i) es igual que el apartado anterior, en este apartado también se tiene en cuenta la distancia entre ejes (eje de motor Stirling y eje del generador) y la longitud de la correa.

En primer lugar, se presupone una distancia entre ejes, como por ejemplo $3,5$ centímetros. Esta distancia se puede elegir, ya que a la hora de hacer la estructura, se puede diseñar de manera que ambos ejes estén a esa distancia.

Una vez se sabe la distancia entre ejes, se debe determinar los diámetros de ambas poleas. Para esto se usa el factor de transmisión en la ecuación (28). El caso es que desmontando un radiocasete antiguo, había un juego de poleas. Donde se puede medir el diámetro de la polea conductora (eje de motor Stirling) que es de $2,5$ centímetros y el de la polea conducida (eje del generador) que es de $0,5$ centímetros.

$$i = \frac{\text{diámetro (motor Stirling)}}{\text{diámetro (generador)}} = \frac{0.025m}{0.005m} = 5$$

Estas no se pueden usar en este proyecto, ya que entre ellas el factor de transmisión es menor a $16,67$, que es el mínimo que se calculó. Por lo tanto, se calculan ambos diámetros a partir del factor de transmisión para poder conocerlos y decir que hacer.

$$\text{diámetro (motor Stirling)} = \text{diámetro (generador)} \cdot i = 0.005 \cdot 16,67 = 0.0014m$$

$$\text{diámetro (generador)} = \frac{\text{diámetro (motor Stirling)}}{i} = \frac{0.025m}{16.67} = 0.083m$$

Las posibles soluciones a este problema con las poleas, puede ser diseñar una de las dos en SolidWorks e imprimarla en la impresora 3D. En este caso en concreto, se elige diseñar la polea conductora o la polea del eje del motor Stirling, ya que, es la única posibilidad. Es sencillo, la polea que se debería diseñar para el eje del generador, tiene el mismo diámetro que el propio eje.

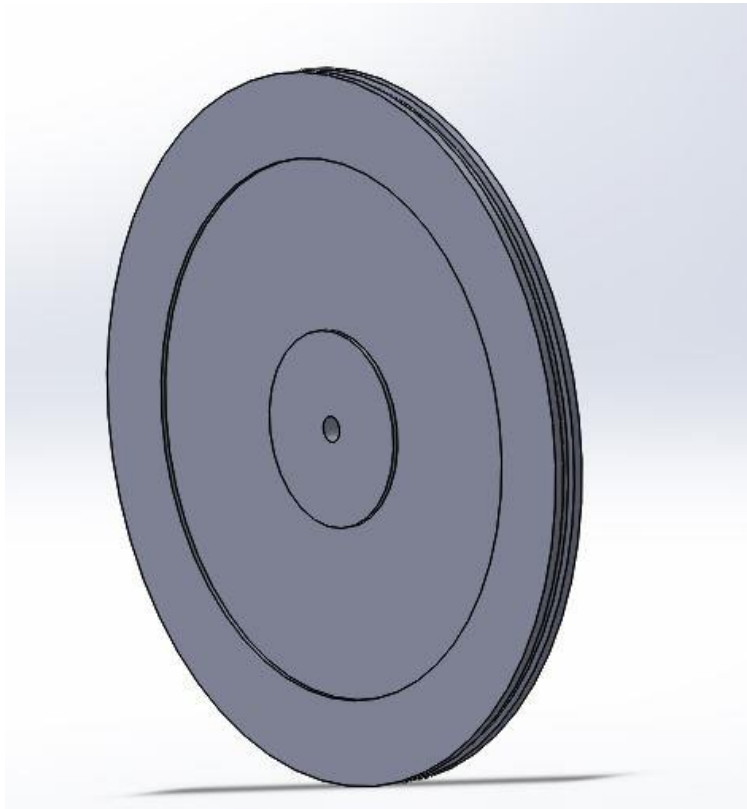


fig. 6. 7. Diseño de la polea conductora.

A consecuencia del nuevo diámetro de la polea conductora, y sabiendo que su radio es de 4cm aproximadamente, se cambia automáticamente la distancia entre ejes. Ya que la propuesta anteriormente no es posible llevarla a cabo. De esta manera, se propone una nueva distancia entre ejes de 5,5 centímetros. Ahora conociendo los diámetros de ambas poleas, y la nueva distancia entre los ejes, se procede a calcular el largo de la correa necesaria.

$$L = 1,57(D + d) + 2A + \frac{(D-d)^2}{2A} \quad (29)$$

Si se sustituyen los valores obtenidos anteriormente se obtiene una longitud de la correa de 260,11mm. Para asegurar que el diámetro de la polea pequeña es de 5 milímetros, se hace la relación de diámetros/revoluciones siguiente:

$$D_1 \cdot n_1 = D_2 \cdot n_2 \quad (30)$$

Donde D_1 es el diámetro de la polea conductora, D_2 el diámetro de la polea conducida, n_1 las revoluciones por minutos de la polea conductora y n_2 las revoluciones de la polea conducida.

Para finalizar, en la ecuación 30, se despaja D_2 para cumplimentar que el diámetro dicho anteriormente es correcto. Con lo cual:

$$D_2 = \frac{D_1 \cdot n_1}{n_2} = \frac{83 \cdot 120}{2000} = 4,98mm$$

6.4. Cálculo eléctrico.

A continuación se harán los cálculos de la parte eléctrica del proyecto. En esta se deben de tener en cuenta las tensiones, la corriente y la potencia de entrada y de salida. En este proyecto se utiliza un motor Slot, que a 2000rpm genera 9V a 1,5A y una potencia de 13.5W y la tensión y corriente que se necesita para cargar dispositivos móviles es de 5V y 2A y una potencia de 10W.

Para llevar a cabo este sistema eléctrico, se necesita un regulador de voltaje 7805, su función es regular la tensión de entrada para que el voltaje de salida sea el deseado. De esta manera se pretende aportar el voltaje y el amperaje necesario para la carga de los dispositivos móviles.

Dentro de los reguladores de voltaje con salida fija, se encuentran los pertenecientes a la familia LM78xx, donde "xx" es el voltaje de la salida. Estos son 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18 y 24V, entregando una corriente máxima de 1 Amper y soporta consumos pico de hasta 2.2 Amperes. Poseen protección contra sobrecargas térmicas y contra cortocircuitos, que desconectan el regulador en caso de que su temperatura de juntura supere los 125°C.

En la figura siguiente se puede observar las conexiones de este regulador de tensión, este en la patilla 3 se conectaría el positivo del generador, y en la patilla 2 se conectaría el negativo. En la salida va el cable, o conexión, para la carga de los dispositivos móviles. Se puede observar que en la figura XX, hay dos condensadores, estos sirven básicamente para absorber los picos de tensión y además por si la corriente continua tiene ruido.

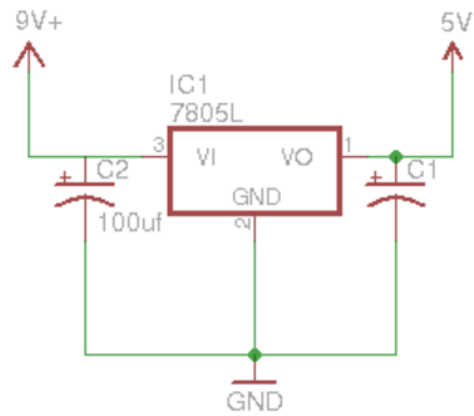


fig. 6. 8. Esquema del sistema eléctrico. Fuente: jumptuck.com

Con este circuito, se consigue una tensión de salida segura de 5V y una corriente de 1A que es más que suficiente para cargar móviles, con el hándicap que el tiempo de carga es mayor.

7. Montaje y test del Sistema

7.1. Montaje del Sistema

A continuación, se explicará el proceso de montaje del sistema de generación de electricidad a partir del motor Stirling.



fig. 7. 1. Motor Stirling LTD

Para empezar con la descripción del montaje del motor, debemos saber que consta de 6 piezas fundamentales, motor, polea, correa, motor eléctrico y plancha de sujeción, además de piezas básicas de sujeción, es decir, bridas, tornillos y tuercas.

Los pasos para obtener el montaje elementos mecánicos son los siguientes:

- 1- Encajar el motor eléctrico a la plancha mediante presión.

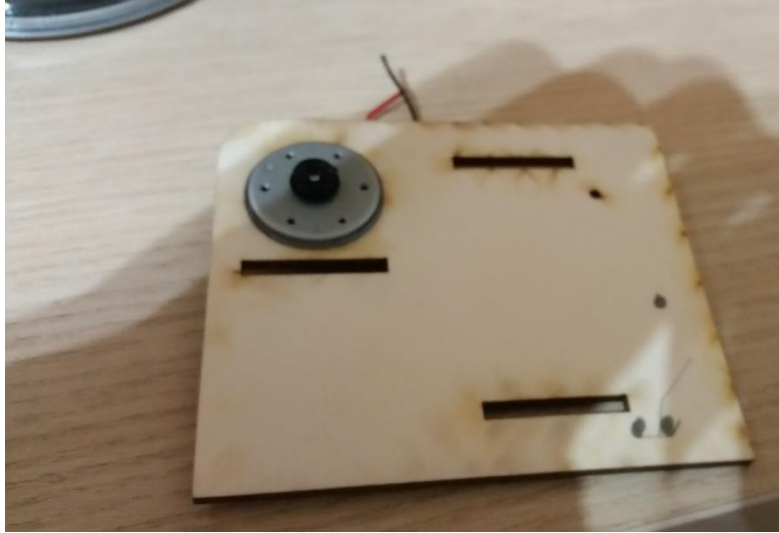


fig. 7. 2. Anclaje a presión del motor en la estructura

- 2- Sujetar la plancha al motor Stirling.
- 3- Añadirle al motor Stirling la polea de transmisión en el extremo más cercano a la plancha que sujeta el motor eléctrico, asegurándose que queda restringido el movimiento libre de la polea.



fig. 7. 3. Acoplamiento de polea al eje motor.

- 4- Añadir la correa entre las poleas de transmisión.

Los pasos para el montaje del circuito eléctrico para transmitir la potencia térmica a energía eléctrica son los siguientes:

- 1- Conexión de los cables positivo, negativo a la placa protoboard. El positivo del generador debe conectarse a la patilla de entrada del regulador de voltaje (7805), el negativo debe conectarse directamente al GND. La conexión de salida es la que se conecta con el dispositivo móvil que se pretende cargar.

7.2. Verificación y test del sistema.

Para verificar el funcionamiento del sistema, primero se comprueba que el motor Stirling funcione correctamente en el rango de temperaturas que se han comentado anteriormente y este funciona correctamente. En función del calor que se le aplique aumenta o disminuye la velocidad, a más calor más velocidad.

Seguidamente, al motor, se le montan todos los accesorios diseñados y el generador Slot. Una vez montado la parte mecánica del sistema, se procede a poner en marcha el motor Stirling, se comprueba que el motor Stirling no funciona.

Después de comprobar que el motor Stirling con el motor eléctrico Slot no funciona, se comprueba si en el mercado existen motores de corriente continua con menos fricción y se encuentran dos tipos de motores, un tipo de motor de casete y otro de un video VHS. Estos dos motores tienen menos fricción que el Slot, ya que tiene más bobinas y la fuerza que hay que aplicarle para girar el eje es más baja.

A continuación, se cambia el Slot por el motor del video en VHS, este presenta el mismo síntoma, el motor Stirling al quitar la correa de la polea, comienza a girar, en cambio, cuando se le vuelve a poner la correa, se para. Pasa lo mismo con el motor casete, el motor Stirling parece que no tiene fuerza para mover cualquiera de los tres generadores propuestos.

Suponiendo que no fuera falta de fuerza, se prueba de nuevo cada uno de los motores eléctricos usados como generadores, con correas de diferentes espesores y diámetros, de manera que estas correas queden más tensas o menos tensas. Pero el problema persiste, y el motor Stirling se clava y no funciona cuando tiene la correa puesta.

En una tercera suposición de fallo, puede ser la fuente de calor usada para testear el sistema. Esta es un vaso de agua, con agua hirviendo, el problema seguía persistiendo por mucho que se calentara el agua. Una posible solución podría ser, conseguir una fuente de calor que mantuviera la temperatura constante, ya que un vaso de agua pierde calor con el tiempo.

El hecho de no haber podido mover el generador, no permite conocer la tensión real que este puede generar en el sistema. Con lo cual, no saber con certeza si sería posible cargar dispositivos móviles con este sistema.

8. Conclusión

En este apartado queda reflejada toda la información sobre el aprendizaje del proyecto, así como los problemas que se han encontrado.

Para comenzar este punto, se puede decir que este proyecto es uno de los más complejos que habían ofertados y esto es debido a que los motores Stirling no están del todo desarrollados, y después de haber hecho el proyecto, se puede decir que solo hay un fabricante que los fabrique en serie, a más a más, estos los fabrican para el aprendizaje y no para su uso cotidiano.

En el proyecto se ha llevado a cabo una búsqueda exhaustiva de fabricantes de motores Stirling, de los cuales se han encontrado muy pocos. Para conocer el tipo de motores Stirling que existen, se ha realizado un estudio de mercado. De este estudio de mercado, se han encontrado todos los tipos de motores Stirling, el problema es que con las condiciones propuestas, solo sirve un tipo.

Dicho de otra manera, el conocimiento necesario al principio del proyecto era básicamente los tipos de motor Stirling, las diferentes maneras de generar electricidad a partir de energía mecánica, y la manera de obtener la tensión y corriente necesarias para la carga de los dispositivos.

El primer problema surge a la hora de realizar el diseño del motor Stirling, que era el objeto inicial del proyecto, el problema viene durante la búsqueda de información, se ha preguntado a diferentes fabricantes sin obtener respuesta y los antecedentes de complejidad a la hora de su montaje. Con lo cual se decide dar una vuelta de hoja al objeto, y se decide no diseñar el motor Stirling sino un sistema de generación de electricidad. Este se hace a partir del uso que se le va a dar, es decir, que potencia se necesita, como se consigue esa potencia a partir de un generador, que revoluciones necesita el generador para generar esa potencia y una vez visto eso, buscar el motor Stirling adecuado a las necesidades y a las condiciones propuestas.

Del anteproyecto se establecen las mismas objetivos y especificaciones técnicas para permitir que el proyecto sea factible.

Para realizar el proyecto, se necesita un generador que sea capaz de generar suficiente electricidad como para cargar un dispositivo móvil. Para esto se pensó de primeras utilizar un motor Slot, este necesitaba 2000rpm para generar 9V y 1,5A suficiente para cargar un móvil.

El motor Stirling solo podía ser de un tipo, uno de baja temperatura. Ya que la temperatura de la que se dispone en las tuberías de ACS del Tecnocampus es de 70°C, con lo cual se obtiene una diferencia de temperatura de 50°C. Esta única opción plantea un problema, las revoluciones bajas a la que trabaja. El generador necesita 2000rpm y el motor Stirling funciona a 150rpm como mínimo, con lo cual se ha tenido que hacer un cálculo de poleas, para que el eje del generador gire a las revoluciones estipuladas. Una vez hecho estos cálculos se decide hacer el diseño de la polea conductora, esta se imprime con la impresora 3D.

Para poder acoplar el generador al motor Stirling, se ha diseñado una estructura, esta está dispuesta para poder acoplarse al soporte del motor dejando el eje con la polea en el interior, dejándola alineada con la polea del eje del motor Stirling.

Seguidamente se plantea la carga de los dispositivos móviles. Obteniendo los datos anteriores, surge otro problema. ¿Cómo regular la tensión? Realizando una búsqueda, se encuentra un regulador 7805, su función es coger la tensión de entrada (generada) y regularla a 5V. Es un dispositivo electrónico que ha sido elegida como la solución para el sistema eléctrico del proyecto.

El problema principal ha llegado a la hora del montaje del sistema. El prototipo no ha funcionado. Primeramente se ha montado todos los accesorios al motor Stirling, una vez se tenía montada la parte mecánica, el motor no ha funcionado, en cambio desconectando las correas, el motor funciona perfectamente. Se ha probado de todas las maneras posibles, probando diferentes motores, con menos fricción que el Slot, y no ha funcionado el sistema. Se han probado diferentes correas para ver si el problema era la fricción que estas causaban, pero tampoco ha resultado. La única opción que no se ha podido probar es usar una fuente de calor que mantenga la temperatura, ya que la que se estaba usando no era fiable, ya que pierde calor en función del tiempo.

DESVIACIONES DE LA PLANIFICACIÓN

La planificación del proyecto se ha visto afectada debido a la falta de experiencia en el campo de los motores Stirling, por lo tanto, se ha tenido que invertir mucho tiempo sobre todo al montaje del prototipo y a la búsqueda de la solución eléctrica para el proyecto.

DESVIACIONES DEL PRESUPUESTO

Durante el proceso de ingeniería técnica, el presupuesto ha variado poco como se puede observar en las tablas siguientes:

presupuesto		
capitulo	descripción	euros
1	proyecto ingenieria	23.980,00 €
2	materiales	293,88 €
3	amortizaciones	13.969,00 €
total		38.242,88 €
IVA 21%		8.031,00 €
TOTAL PRESUPUESTO		46.273,88 €

presupuesto		
capitulo	descripción	euros
1	proyecto ingenieria	23.980,00 €
2	materiales	50,50 €
3	amortizaciones	13.969,00 €
total		37.999,50 €
IVA 21%		7.979,90 €
TOTAL PRESUPUESTO		45.979,40 €

Estos cambios se deben que en el primer presupuesto se computó el coste de los materiales para el diseño y prototipaje del motor Stirling, con el cambio de objeto, el motor Stirling se compra. Con lo cual baja 220€ el coste de materiales.

PUNTOS FUERTES Y DEBILES DEL PROYECTO:

Se puede decir que los puntos fuertes del proyecto son:

1. El sistema permite aprovechar el calor residual para generar electricidad y su ahorro en el coste de la factura de la luz a largo plazo.
2. El sistema es pequeño y se puede amoldar a cualquier superficie.
3. El sistema puede funcionar todo el día con un mantenimiento bajo

Por otro lado, los puntos débiles del proyecto son:

1. El sistema prototipo no se ha conseguido que funcione.

CONOCIMIENTO NECESARIO NO DISPONIBLE AL INICIO DEL PROYECTO

- Tipos de motor Stirling.
- Funcionamiento del ciclo Stirling.
- Desconocimiento del mercado, marcas y fabricantes.
- Desconocimientos de cómo regular la tensión de salida.
- Como generar la electricidad.

IDENTIFICAR EL CONOCIMIENTO NO PREVISTO

Una vez acabado el proyecto se han adquirido unos conocimientos que no se esperaban, con los que se cree que sería factible mejorar el sistema diseñado pudiendo utilizar una fuente de calor mayor a la propuesta, con motores Stirling más potentes que lógicamente precisan de mayor temperatura de funcionamiento.

OBJETIVOS Y ESPECIFICACIONES TECNICAS CONSEGUIDAS AL 100% O DE MANERA PARCIAL.

1. Elección del motor Stirling

	conseguido
temperatura de funcionamiento	si
revoluciones por minuto	si
acoplable a tuberías	si

El motor Stirling elegido para el proyecto, cumple con las especificaciones marcadas al inicio del proyecto. Funciona con una diferencia de temperatura menor a 50°C, y puede girar a más de 180rpm.

Este motor se puede aplicar en las tuberías de la universidad, haciéndole un soporte a medida para las tuberías.

2. Generación de electricidad

	conseguido
generación de 5V y 2A	no
conexión USB	no
generación a la velocidad del motor	no

La generación de electricidad es la parte más importante del proyecto, teóricamente se ha conseguido la tensión de salida, eso sí haciendo un cálculo de reducción por poleas, el problema como anteriormente se ha mencionado, el motor no gira con la correa conectada del motor Stirling al generador.

3. Conectividad por USB

Este objetivo se ha cumplido, ya que los cables USB son sencillos de encontrar en el mercado con las especificaciones seleccionadas.

FUTURAS LINEAS DE TRABAJO

Se han detectado que una posible línea de trabajo sería la implementación de un motor Stirling que funcione con mayor temperatura, ya que son más potentes y serían capaces de mover el generador. Aunque conllevaría a aumentar el coste del producto, y se tendría que buscar una fuente de calor residual mucho más potente. Esta última aplicación serviría más para el uso en la industria siderúrgica por ejemplo.

También sería una buena línea de trabajo, la creación de una empresa que fabrique los motores Stirling en serie, y no sea para uso educativo, ya que solo se ha encontrado una empresa que se dedique a ello, el problema es que era para uso educativo.

9. Referencias

1. Wikipedia. Gas. [Online] [Visitado: 5-4-2016.] <http://en.wikipedia.org/wiki/Gas>
2. Wikipedia. *Ideal Gas*. [Online] [visitado: 8-4-2016.] http://en.wikipedia.org/wiki/Ideal_gas.
3. Finkelstein, Theodor and Organ, Allan J. *Air Engines*. Suffolk : Professional Engineering Publications, 2001.
4. Wikipedia. *Reynolds Number*. [Online] [Visitado: 6-4-2016.] http://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number.
5. The Engineering Toolbox. *Air Properties*. [Online] [Visitado: 23-03-2016.] http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html.
6. GEOTHERMAL ELECTRICITY PRODUCTION BY MEANS OF THE LOW TEMPERATURE DIFFERENCE STIRLING ENGINE [Online] [Visitado: 17-3-2016] http://rgn.hr/~mgolub/radovi4web/ad-3/IN_MEMORIAM_IVO_KOLIN.pdf
7. Martini, W. R. Stirling Engine Design Manual. Richland : Martini Engineering, 1983.
8. Kolin, Ivo. Stirling Motor - History, Theory, Practice. Dubrovnik : Zagreb University Publications, Ltd., 1991.
9. Sandia National Laboratories. *News Releases*. [Online] [9-4-2016.] <http://www.sandia.gov/news/resources/releases/2008/solargrid.html>.

Escola Universitària Politécnica de Mataró

Centre adscrit a:



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE UN SISTEMA CON MOTOR STIRLING PARA TRANSFORMAR ENERGIA LIBRE EN ELECTRICIDAD

Plános

Darío Rodríguez
PONENT: Klara Vekony

PRIMAVERA 2016



TecnoCampus
Mataró-Maresme

Índex.

Document A-1.Estructura	3
Document A-2. Soporte de la estructura.....	5
Document A-3. Poleas.....	7

Escola Universitària Politécnica de Mataró

Centre adscrit a:



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE UN SISTEMA CON MOTOR STIRLING PARA TRANSFORMAR ENERGIA LIBRE EN ELECTRICIDAD

Estudi econòmic

Darío Rodríguez
PONENT: Klara Vekony

PRIMAVERA 2016



TecnoCampus
Mataró-Maresme

Índex.

<u>Índice de tablas</u>	I
<u>1. Viabilidad Económica</u>	3
<u>1.1. Presupuesto del proyecto</u>	3
<u>1.2. Cuota de mercado</u>	3
<u>1.3. Costes de inversión</u>	4
<u>1.4. Análisis de rentabilidad</u>	5
<u>1.5. Presupuesto</u>	7

Índice de tablas

<i>tabla 1. 1. Presupuesto</i>	3
<i>tabla 1. 2. Generación de electricidad</i>	4
<i>tabla 1. 3. Costes inversión</i>	5
<i>tabla 1. 4. Análisis de rentabilidad</i>	6

1. Viabilidad Económica

En la viabilidad económica se incluye el presupuesto del anteproyecto y el proyecto detalle, los gastos de fabricación i un análisis de rentabilidad en 5 años.

1.1. Presupuesto del proyecto

En el presupuesto se incluye, los gastos de la elaboración del proyecto de ingeniería, el coste del prototipo y las amortizaciones.

presupuesto		
capitulo	descripción	euros
1	proyecto ingenieria	23.980,00 €
2	materiales	50,50 €
3	amortizaciones	13.969,00 €
total		37.999,50 €
IVA 21%		7.979,90 €
TOTAL PRESUPUESTO		45.979,40 €

tabla 1. 1. Presupuesto

1.2. Cuota de mercado

La cuota de mercado, en este caso, es la cuota de uso. Ya que es un proyecto únicamente dirigido al Tecnocampus, para ahorrar una cantidad de dinero importante.

Lo primero que tenemos que hacer es, una búsqueda de la cantidad de personas que trabajan y estudian en el TCM, en esto caso unes 3.500 personas aproximadamente. De estas se seleccionará un 5%, por lo tanto, son 175 personas que utilizaran el cable del motor Stirling.

Una vez se estima la cantidad de personas que harán uso del sistema, se tendrá que estimar cuantas horas al día será utilizado el sistema. La universidad se mantendrá abierta 13 horas al día, a todas horas hay afluencia de alumnado, sobre todo por la mañana. Entonces se estima un intervalo de 3 horas cargando el móvil alrededor de 175 personas.

Ahora que se conoce el nombre de personas que utilizaran el sistema de carga de baterías de 5 a 6V, se puede estimar cuantos motores se precisan para poder hacer la carga de todos estos. Entonces con el voltaje de 12 V i la corriente de 3A nominal, se puede determinar que se puede cargar 2 baterías con un único motor, el que da unos 88 motores.

Una vez se obtienen estas dos estimaciones, se puede hacer la estimación de la energía generada por el motor Stirling. Esta se hará de la siguiente manera:

La dinamo tiene una potencia nominal de 30 W. Se multiplican el nombre de motores por la potencia nominal i da 2640W, estos convertidos a kW son: $P=2,64\text{Wh}$. Si cada día se utilizaran durante 3 horas, se multiplica P por tres horas y el resultado será el consumo obtenido en un día. I si este resultado lo multiplicamos por 302 días (se han descontado los fines de semana, agosto, semana santa i las vacaciones de navidad) dará una generación de energía eléctrica anual. Esta es:

2.391,84kWh/año.

generación de la dinamo	
2.640,00	W
2,64	kWh
7,92	kWh/dia
2.391,84	kWh/any

tabla 1. 2. Generación de electricidad

Finalmente, estos datos se tendrán que comparar con el consumo eléctrico del TCM. Se pidió al sr.Joan Gil estos datos, i amablemente los facilito. Un dato relevante es el consumo anual de electricidad: 2.325.572,00 kWh/año.

Según las paginas visitadas, el precio de la luz es de 0,136€/kWh, por lo tanto, el TCM aproximadamente pagará unos 316.277,79€, y el ahorro que se propone con este proyecto es de 325,29€.

1.3. Costes de inversión

En este apartado se incluyen los costes del proyecto de ingeniería, y varios costes de ordenadores, herramientas, etc.

Costes inversión	
Proyecto ingeniería	38.967,50 €
prototipo	182,62 €
Varis	0,00 €
Total	39.150,12 €
En 5 años	7.830,02 €

tabla 1. 3. Costes inversión

1.4. Análisis de rentabilidad

Se prevé que se obtendrán beneficios pasados 7 años de la puesta en marcha del proyecto, por lo tanto el proyecto es viable económicamente. A pesar de eso, se ha continuado haciendo análisis a 5 años vista, con un tipo de interés que se ha computado al 15% (Fuente EUROSTAT en 04/2015) el índice de precios Industriales al 0,4%.

Se tiene en cuenta que el precio del motor Stirling comercializado es de 25€.

	2016	2017	2018	2019	2020
Demanda	88	88	88	88	88
Ingresos	2.200,00 €	16.070,6 0 €	16.070,6 0 €	16.070,6 0 €	16.070,6 0 €
Costes de producción i gastos de material	1.650,00 €	11.549,1 2 €	11.549,1 2 €	11.549,1 2 €	11.549,1 2 €
Amortizaciones	7.830,02 €	7.830,02 €	7.830,02 €	0,00 €	0,00 €
Beneficios antes de impuestos	- 7.280,02 €	- 3.308,54 €	- 3.308,54 €	4.521,48 €	4.521,48 €
Beneficio neto	- 5.751,22 €	- 2.613,75 €	- 2.613,75 €	3.571,97 €	3.571,97 €
Cash flow	2.078,81 €	5.216,27 €	5.216,27 €	3.571,97 €	3.571,97 €
VAN	2.067,42 €	5.159,30 €	5.216,27 €	3.571,97 €	3.571,97 €

tabla 1. 4. Análisis de rentabilidad

VAN TOTAL: 11.756,92€

Después se tiene que calcular el índice coste-beneficio.

ICB: 30,03%

El proyecto es rentable a largo plazo, pero preservar el medio ambiente no tiene precio.

Igualmente el objetivo de este proyecto no es que sea viable o no, sino la adquisición de Nuevos conocimientos en el motor Stirling.

1.5. Presupuesto

TOTAL CAPÍTOL I	23980 €
TOTAL CAPÍTOL II	50,50 €
TOTAL CAPÍTOL III	13.969,00 €
<hr/>	
TOTAL	37.999,50 €
IVA 21%	7.979,90 €
<hr/>	
TOTAL PRESSUPOST	45.979,40 €