
USO E IMPLEMENTACIÓN DE MOTORES STIRLING EN BUQUES

Treball Final de Grau



Facultat de Nàutica de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya

Treball realitzat per:

Martín Romero Cueto

Dirigit per:

Manuel Rodríguez Castillo

Grau en Enginyeria en Sistemes i Tecnologia Naval

Barcelona, desembre de 2018

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi tutor, Manuel Rodríguez Castillo, por su dedicación, apoyo y paciencia para la realización de mi trabajo final de carrera.

También me gustaría agradecer a mi familia por el soporte que me han ofrecido siempre que lo he necesitado.

A todos vosotros os doy las gracias.

Resumen

Desde los albores de la navegación, ha habido varios métodos para propulsar embarcaciones. Desde la primitiva pértiga, pasando por el remo, las velas y las maquinas a vapor. La propulsión naval se halla estable desde hace prácticamente un centenario con los motores de ciclo Diésel. ¿Podría haber otras máquinas capaces de utilizarse en buques?

Este trabajo trata sobre el uso de motores Stirling en buques. Se analizarán desde el punto de vista histórico, mecánico, termodinámico, funcional y aplicativo.

Se programará una hoja de cálculo con la teoría de Schmidt, herramienta clave para la simulación informática de estos motores y para obtener factores característicos como cilindrada, potencia y rendimiento. Una vez obtenidos los parámetros de las máquinas de ciclo Stirling, se procederá a compararlos con sus homólogos actuales de combustión interna, utilizados en la mayoría de las embarcaciones hoy en día para impulsarse y para generar energía eléctrica. De esta forma, se pretende comprobar si estas máquinas podrían implementarse en buques.

Al tratarse de máquinas térmicas de combustión externa, pueden utilizar un gran rango de combustibles, factor muy interesante en buques con grandes consumos de carburantes, en un mundo donde los combustibles fósiles son cada vez más escasos y costosos. En el caso que estos motores fueran utilizables en buques, abaratarían los costes a largo plazo, se podría utilizar un mayor rango de combustibles y se reduciría la emisión de gases contaminantes durante la navegación del buque, factor muy interesante para reducir la contaminación producida por los barcos, y también para cumplir con las normativas sobre emisiones cada vez más restrictivas.

Abstract

From the beginning of navigation, several methods of propulsion have been used. From the primitive pole, to the row, passing to the sails and steam boats. Naval propulsion is stable form practically a century with the Diesel cycle engines. Could there be other machines able to be used in ships?

This thesis is about the use of Stirling engines in ships. They will be analysed from an historian, mechanical, thermodynamic, functional and applicative points of view.

A spreadsheet will be programmed with the Schmidt Theory, crucial tool for the computer simulation of this engines and for obtaining their characteristic factors like displacement, power and performance. When the parameters of Stirling engines will be known, that machines will be compare them with their internal combustion actual homologues used in the majority of the nowadays vessels for propulsion and for electricity generation. In this way, is pretend to check if these machines could be used in ships.

Because they are external combustion machines, they can use a large range of fuels, this is a very interesting factor in vessels with high fuel consumptions, in a world where fossil fuels are more expensive and limited. In the case of these engines will be usable in ships, they will reduce costs in a long timeframe, a big fuel range will be possible to use and exhausts gasses during the ship navigation will decrease. This is an interesting aspect to reduce contamination produced by ship navigation, and to enforce the ship emission rules that every time are more restrictive.

Índice

Agradecimientos	iii
Resumen	v
Abstract	vi
Índice	vii
Listado de Ilustraciones	ix
Listado de Tablas	xii
1. Historia	1
2. El motor Stirling	3
2.1. ¿Qué es?	3
2.2. Partes del motor y componentes	3
2.3. Ciclo de trabajo teórico	6
2.4. Rendimiento	7
2.5. Potencia	8
2.6. Versatilidad	9
2.7. Tipos de motores Stirling	11
2.8. Fluidos de trabajo	16
2.9. Influencia de los parámetros principales en el rendimiento del motor	18
3. Comparativa con los motores de combustión interna alternativos	20
4. Método de cálculo de parámetros para motores Stirling	24
4.1. Teoría de Schmidt	24
4.1.1. Ecuaciones para el motor Alpha	25
4.1.2. Ecuaciones para el motor Beta	28
4.1.3. Ecuaciones para el motor Gamma	29
4.2. Simulación	31
5. Tendencia de los precios de los combustibles	34
6. Motores Stirling en buques	37
6.1. Propulsión	38
6.1.1. Dimensionamiento propulsivo	41
6.1.1.1. Buque de tamaño medio	42
6.1.1.2. Embarcación pequeña	45

6.2. Generación eléctrica	49
6.2.1. Dimensionamiento para generación eléctrica	49
6.3. Aprovechamiento de calor residual	53
6.3.1. Gases de escape	54
6.3.2. Dimensionamiento de regeneración en chimeneas	55
6.3.2.1. Buque de nueva construcción	56
6.3.2.2. Buque con menor vida útil	61
6.4. Aprovechamiento de calor residual mediante circuito de refrigeración	61
6.4.1. Dimensionamiento de planta regenerativa en circuito de refrigeración	63
7. Conclusiones	69
8. Bibliografía	71
9. Webgrafía	72

Listado de Ilustraciones

Ilustración	Título	pág.
1-1	Esquema de la patente del motor Stirling, 1816.....	1
2-1-1	Motor Stirling tipo Alpha	3
2-2	Regenerador ubicado en el interior de un pistón desplazador.....	4
2-3	Esquema de motor Stirling tipo Gamma.....	4
2-4	Pistón de maqueta de motor Stirling.....	5
2-5	Calentador por convección.....	5
2-6	Calentador por radiación.....	6
2-7	Diagrama teórico ciclo Stirling regenerativo T-s y P-v.....	6
2-8	Gráfica Nº Beale vs Temperatura foco caliente.....	9
2-9	Generador de disco Stirling.....	10
2-10	Foco frío en motor Stirling movido por maquina asíncrona.....	11
2-11	Esquema de motor Stirling Alpha, en configuración lineal.....	11
2-12	Esquema de motor Stirling Alpha, en configuración real.....	12
2-13	Esquema de motor Stirling Beta.....	12
2-14	Motor Stirling Beta.....	13
2-15	Esquema de motor Stirling Gamma.....	13
2-16	Esquema de motor Stirling Gamma de baja diferencia de temperatura.....	14
2-17	Esquema de motor Stirling de pistón libre.....	14
2-18	Mecanismo Swash Plate.....	15
2-19	Mecanismo rómbico empleado en motor Stirling Beta.....	15
2-20	Esquema del mecanismo de Ross acoplado en motor tipo Gamma.....	15
2-21	Gráfica Rendimiento vs Potencia específica.....	17
2-22	Gráfica Presión y Rendimiento vs Velocidad angular.....	18
3-1	Motor Stirling en un automóvil.....	21
4-1	Simulación informática de la teoría de Schmidt.....	32
5-1	Tendencia del crudo de aquí a 25 años.....	34
5-2	Tendencia del IFO 380 de aquí a 25 años.....	35
5-3	Tendencia del IFO 180 de aquí a 25 años.....	35
6-1	Gráfica Dificultad implementativa vs. Dificultad constructiva.....	37

6-2	Yate con motor Stirling “Johan de Witt”	39
6-3	Submarino clase Gotland, dotado con motor Stirling.....	40
6-4	Buque OPDR Tánger.....	42
6-5	Simulación informática, buque tamaño medio.....	43
6-6	Simulación informática, gráfica P-V, buque tamaño medio.....	43
6-7	Simulación informática. Diagrama P-Ángulo y Desfases entre volúmenes, buque tamaño medio.....	44
6-8	Simulación informática. Rendimiento y potencia del motor, buque tamaño medio.....	44
6-9	Velero Beneteau Oceanis 31.....	46
6-10	Simulación informática, embarcación pequeña.....	47
6-11	Simulación informática. Gráfica P-V, embarcación pequeña.....	47
6-12	Simulación informática. Diagrama P-Ángulo y Desfases entre volúmenes, embarcación pequeña.....	48
6-13	Simulación informática. Rendimiento y potencia del motor, embarcación pequeña.....	48
6-14	Motor Auxiliar Caterpillar 6M20C.....	50
6-15	Simulación informática, motor auxiliar.	51
6-16	Simulación informática. Gráfica P-V, motor auxiliar.....	51
6-17	Simulación informática. Diagrama P-Ángulo y Desfases entre volúmenes, motor auxiliar.....	52
6-18	Simulación informática. Rendimiento y potencia del motor, motor auxiliar.....	52
6-19	Sistema de gases de escape de un buque.....	54
6-20	Área de instalación de los motores Stirling.....	55
6-21	Simulación informática, instalación en chimenea.....	57
6-22	Simulación informática. Gráfica P-V, instalación en chimenea.....	57
6-23	Simulación informática. Diagrama P-Ángulo y Desfases entre volúmenes, instalación en chimenea.....	58
6-24	Simulación informática. Rendimiento y potencia del motor, instalación en chimenea.....	58
6-25	Simulación informática. Porcentajes y Ahorros, instalación en chimenea.....	59
6-26	Simulación informática. Amortización, instalación en chimenea.....	60
6-27	Simulación informática. Ahorro anual de combustible, instalación en chimenea.....	61
6-28	Circuito de refrigeración del motor CAT 6M20C.....	62
6-29	Simulación informática, circuito de refrigeración.....	64
6-30	Simulación informática. Gráfica P-V, circuito de refrigeración.....	64
6-31	Simulación informática. Diagrama P-Ángulo y Desfases entre volúmenes, circuito de refrigeración.....	65

6-32	Simulación informática. Rendimiento y potencia del motor, circuito de refrigeración.....	65
6-33	Simulación informática. Porcentajes y Ahorros, circuito de refrigeración.....	66
6-34	Simulación informática. Amortización, circuito de refrigeración.....	67
6-35	Simulación informática. Ahorro anual de combustible, circuito de refrigeración.....	67

Listado de Tablas

Tabla	Título	pág.
1	Número de Beale en función de la optimización del motor y la temperatura del foco caliente....	9
2	Familia del motor térmico.....	20
3	Comparativa motor Stirling vs. Otto en automóvil.....	22
4	Abreviaciones y unidades usadas en la teoría de Schmidt.....	25
5 y 6	Comparativas de potencia y rendimiento a iguales condiciones de trabajo.....	32
7	Tendencia de precios de combustibles.....	36
8	Coste medio de los combustibles en los próximos 25 años.....	36
9 y 10	Comparativa de características motor original y motor Stirling.....	45
11 y 12	Comparativa de características motor original y motor Stirling.....	48
13	Regímenes y características de los motores Caterpillar CAT serie 20C.....	50
14 y 15	Resultados de la comparativa MMAA Diésel vs. Stirling.....	53
16	Datos de la instalación de motores Stirling y de sus características.....	56
17	Características del circuito de refrigeración del motor CAT 6M20C.....	63
18	Características de motores Stirling acoplados en el circuito de refrigeración.....	63

1. Historia

Las máquinas que impulsaron la revolución industrial fueron los motores a vapor, que contaban solo con unas pocas décadas en funcionamiento. Debido a las precoces máquinas de vapor de la época, a la rápida expansión de estas, y a las limitaciones de materiales y técnicas constructivas, resultaban ser muy peligrosas de operar. Estas solían sobrecalentarse, romperse las piezas e incluso explotar las calderas con bastante frecuencia, con las consecuencias de graves accidentes laborales y muertes. Por este motivo, no se tardó en buscar sustitutos para la máquina de vapor. En 1759 Wood modificó la máquina de vapor de Newcomen para que trabajara con aire caliente. En el año 1801, Glazebrook introdujo el ciclo cerrado en estas máquinas.

El reverendo escocés Robert Stirling (1790-1878), buscó un sustituto más seguro de operar y con mayor rendimiento que la máquina de vapor, que fuera capaz de competir con esta en la revolución industrial. Stirling defendía que una máquina que trabajara a menor presión reduciría el riesgo de roturas y explosiones, y que el hecho de poder utilizar aire como fluido de trabajo en lugar de vapor de agua facilitaría la construcción, abarataría su coste y su operación sería más simple.

En 1816, el reverendo patentó y construyó el “motor de aire caliente”, como él lo bautizó. La primera vez que se le dio un uso práctico al motor Stirling fue 2 años más tarde, cuando dicha máquina se instaló en una mina, usándose como bomba para achicar agua.

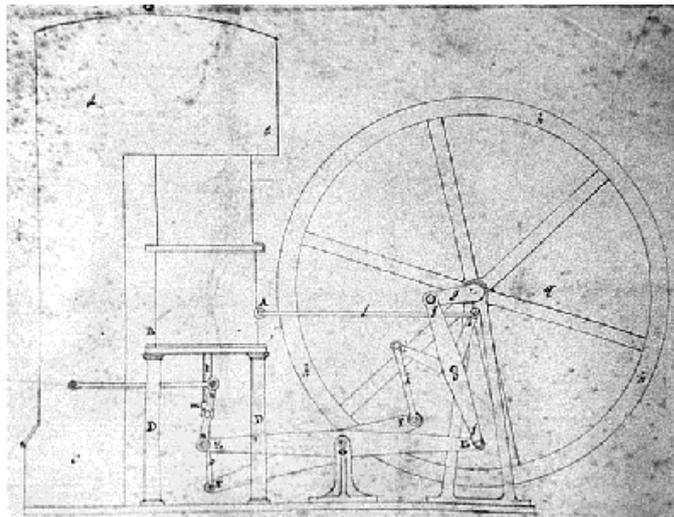


Ilustración 1-1. Esquema de la patente del motor Stirling, 1816

Debido a los problemas que causaba la primitiva máquina no duró mucho tiempo en funcionamiento. En el año 1827, Robert se alió con su hermano, el ingeniero James Stirling. Juntos, mejoraron el diseño inicial y añadieron un regenerador, el cual aumentaba en gran medida la potencia y el rendimiento de la máquina. En 1842 dos máquinas Stirling monocilíndricas se instalaron en una fundición en Inglaterra. La primera poseía un pistón de 30cm de diámetro y 61cm de carrera, produciendo 21cv a 40rpm. La segunda máquina era más grande, con un pistón de 40cm de diámetro y 120cm de carrera, que girando a 40rpm generaba 45cv. Operándolos correctamente, estos primeros motores Stirling funcionales tenían un

consumo específico efectivo de 1130g/cv*h. Dicho consumo era muy parecido al de las máquinas de vapor más punteras de la época, que apenas alcanzaban el 10% de rendimiento.

En la segunda mitad del siglo XIX, las mejoras en rendimiento y seguridad del motor a vapor redujo significativamente la expansión y el desarrollo del motor Stirling. Su uso se vio limitado al entorno doméstico. Pequeñas bombas de agua empleadas en granjas y aparatos de poca potencia, como ventiladores de sobremesa alimentados por lámparas de aceite. Los motores Stirling de poca potencia, entre 0,1 y 4KW eran baratos de producir, fiables y silenciosos.

En el último tercio del siglo XIX, con la aparición de los motores de ciclo Otto y Diésel, el motor Stirling quedó prácticamente en desuso, aunque se seguían produciendo en pequeña escala con fines domésticos. Durante las primeras décadas del siglo XX, con la introducción en la industria y en los hogares de los motores eléctricos, el motor Stirling fue olvidado.

En la década de 1930, la compañía Philips buscaba una máquina para generar electricidad para radios portátiles, con la intención de comercializarlas en entornos rurales. Tras analizar las posibilidades, se decantaron por el motor Stirling, ya que podía alimentarse de cualquier combustible y era muy silencioso en funcionamiento. Las mejoras en materiales y técnicas constructivas, unos 80 años después de las últimas investigaciones serias en este tipo de máquinas, convirtió a los diseños y prototipos de Philips en motores mucho más eficientes que los de la época del reverendo Stirling. Tuvieron serios problemas para comercializar esas radios y el proyecto fracasó. Los generadores Stirling de la compañía acabaron en institutos y universidades como modelos didácticos.

En la segunda mitad del siglo XX, el motor Stirling volvió a ser máquina de estudio e investigación, en esta ocasión, pensando en él para generar energía limpia. Ensayos con distintos gases de trabajo y mayores presiones, lograron fabricar motores Stirling más eficaces y funcionales. Lo cual ha permitido ubicarlos en lugares con gradiente térmico aprovechable, como en chimeneas de barcos o plantas cogeneradoras, así como plantas solares de discos térmicos. También se estudian y ensayan estas máquinas para usarlas como bombas de calor y refrigeración aprovechando su reversibilidad.

2. El motor Stirling

2.1. ¿Qué es?

El motor Stirling es una máquina térmica alternativa de combustión (o aporte de calor) externa, capaz de convertir calor en trabajo y viceversa a través de un ciclo termodinámico cerrado y regenerativo, Con expansiones y compresiones cíclicas del fluido de trabajo a distintas temperaturas. El flujo está gobernado por cambios de volumen.

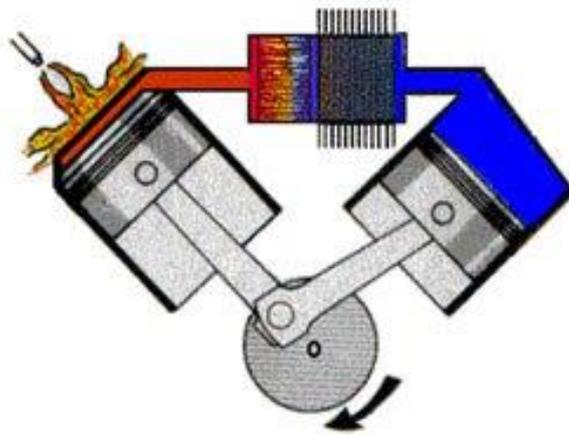


Ilustración 2-1-1. Motor Stirling tipo Alpha

2.2. Partes del motor y componentes

Distinguimos principalmente cuatro partes en el motor Stirling:

- **Foco caliente:** Compartimento donde se ubica el pistón desplazador. Es donde el calor se aporta al ciclo.
- **Foco frío:** Compartimento donde se sitúa el pistón de trabajo. Recibe el gas excitado del cilindro caliente y es donde se produce el rechazo de calor hacia el exterior.
- **Regenerador:** Es una membrana apelmazada donde se almacena parte del gas excitado procedente del foco caliente y se evita que pase al foco frío. Media vuelta de cigüeñal más tarde, parte del aire enfriado en el foco frío fluye hacia el foco caliente. De esta forma, no se desperdicia tanta energía para aumentar o disminuir su temperatura de forma innecesaria. Mediante en regenerador, aumenta el rendimiento y la potencia de la máquina Stirling.



Ilustración 2-2. Regenerador ubicado en el interior de un pistón desplazador

- **Conductos:** Es por donde circula el fluido de trabajo del foco frío al caliente, atravesando el regenerador. El gas es movido por unos émbolos.

Distinguimos las siguientes piezas:

- **Mecanismo biela-cigüeñal:** Formado por bielas, cigüeñal, cojinetes, bancada y volante de inercia. Igual que en los motores de ciclo Otto y Diésel, mediante estos elementos se transforma el movimiento lineal alternativo de los pistones en movimiento rotacional en el cigüeñal.

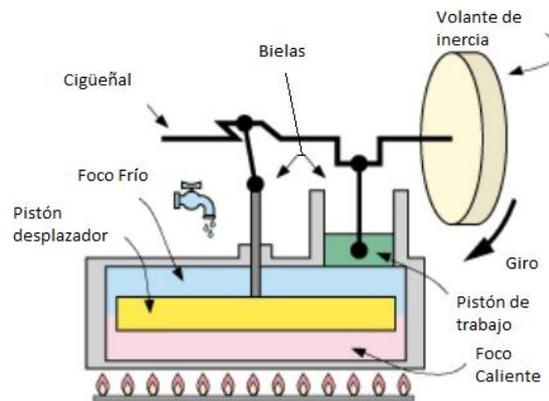


Ilustración 2-3. Esquema de motor Stirling tipo Gamma, apréciase la carencia de regenerador

- **Cilindro:** Es la cámara de volumen variable. Una cara del cilindro queda expuesta a los intercambiadores de calor, mientras que en la otra cara se encuentra el émbolo, quien determina las variaciones volumétricas del cilindro.

- **Émbolos:** Son las piezas encargadas de transmitir fuerzas y movimiento en el interior de los cilindros hacia la biela y el cigüeñal. Existen tres tipos de émbolos utilizados en los motores Stirling:

- 1) **Pistón:** Aguanta una gran diferencia de presión entre sus caras, pero no ha de soportar un gradiente térmico muy grande. Tiene que ser robusto para soportar la presión de trabajo y no ha de tener mucha holgura con el cilindro para asegurar la estanqueidad, suelen colocarse aros para evitar las fugas de gas entre el pistón y el cilindro.

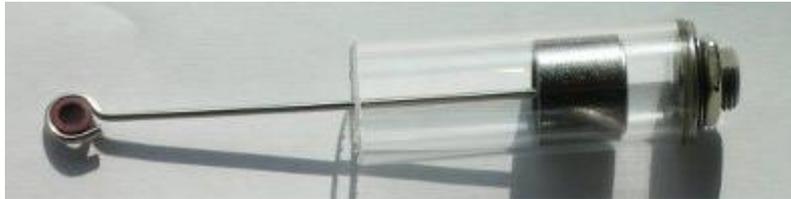


Ilustración 2-4. Pistón de maqueta de motor Stirling

- 2) **Desplazador:** No trabaja con una gran diferencia de presión entre sus caras, su estanqueidad no es nada crítica y suele tener gran holgura con el cilindro para facilitar el paso de fluido entre sus dos caras. Soportan una gran carga térmica y suelen construirse con material térmicamente aislante.
- 3) **Mixto:** Mezcla entre un pistón y un desplazador: Son émbolos que han de soportar una gran variación de presión, seguida de un fuerte gradiente térmico. Son más complejos de construir y resulta complicado encontrar el equilibrio entre pistón y desplazador.

Como componentes que facilitan la transmisión de calor destacamos:

- **Calentador:** Elemento que introduce el calor del exterior del motor al fluido de trabajo. Puede ser por convección, donde los gases de escape entran en contacto con los conductos calentadores, encargados de transportar el fluido de trabajo del motor Stirling. Estos son altamente eficientes, pero requieren mantenimiento por la deposición de carbonilla en la superficie de los conductos, que hace menos eficiente la transmisión de calor.

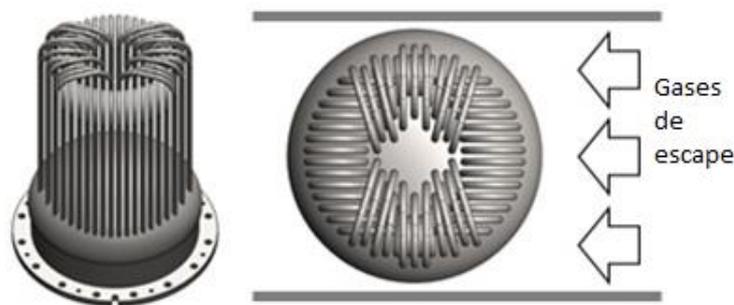


Ilustración 2-5. Calentador por convección

También hay calentadores por radiación. En estos, los gases de escape calientan una campana, en cuyo interior hay aire en contacto con los conductos que transportan el fluido de trabajo. El aire es el encargado de calentar los conductos. La transmisión de calor por radiación es más lenta y ligeramente más ineficiente que la de convección, pero presenta la ventaja que los conductos no se ensucian.

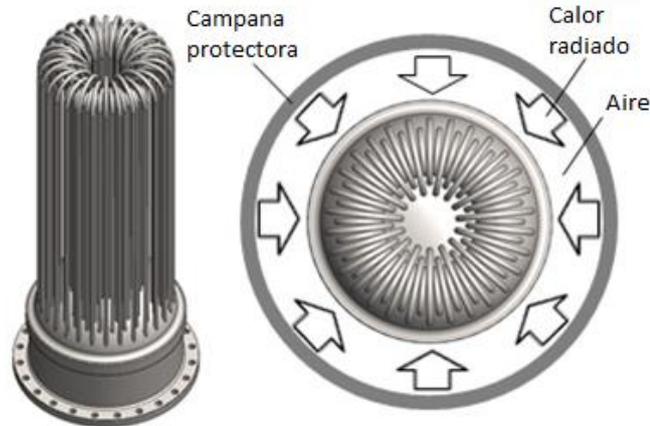


Ilustración 2-6. Calentador por radiación

- **Refrigerador:** Se encarga de reducir la temperatura en el foco frío del motor, de esta forma se consigue mayor rendimiento y potencia. Pueden ser una serie de aletas, cuyo objetivo sea el de aumentar la superficie de contacto del foco frío para que este intercambie su temperatura con la del ambiente. Otra opción aplicable a motores Stirling de poca potencia es el acoplamiento de un ventilador que mueva un flujo de aire hacia las aletas para facilitar el intercambio térmico. En máquinas Stirling de mayor potencia, un circuito de refrigeración líquido suele ser la opción más efectiva.

2.3. Ciclo de trabajo teórico

Estas máquinas operan con dos fases isotermas y dos fases isocóricas, con una regeneración entre las fases isocóricas. A continuación, se explica con mayor detalle:

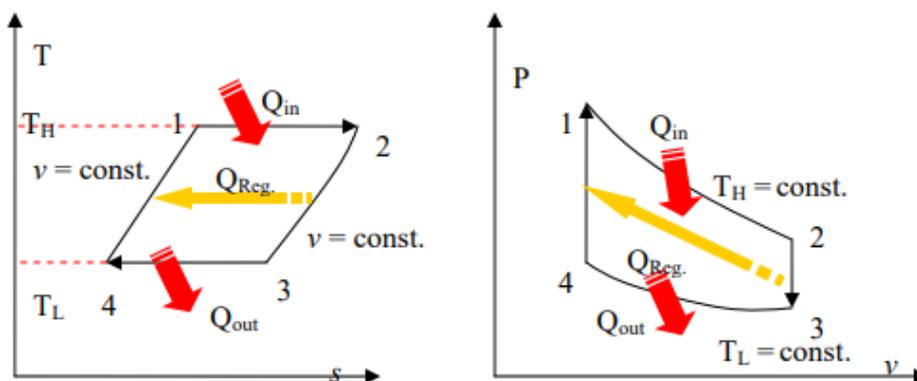


Ilustración 2-7. Diagrama teórico ciclo Stirling regenerativo T-s y P-v

- **Fase 1 a 2. Expansión isotérmica:** Al aplicar calor al pistón desplazador, el gas de su interior se expande sin variar su temperatura, el desplazador sube y la presión cae.
- **Fase 2 a 3. Enfriamiento isocórico:** Al alcanzar el desplazador su PMS, se realiza la transferencia del gas del cilindro caliente al frío de forma isocórica. El pistón desplazador baja, y el pistón de trabajo sube. Entre los dos cilindros, el regenerador acumula una cantidad de calor, por lo cual el gas caliente llega al cilindro frío a menor temperatura.
- **Fase 3 a 4. Compresión isoterma:** En este punto tenemos el pistón de trabajo en su PMS. Llegado a este punto, el calor del gas es rechazado al exterior del sistema en el foco frío. Al perder calor, el gas se contrae y hace bajar al pistón de trabajo y subir al pistón desplazador.
- **Fase 4 a 1. Calentamiento isocórico:** Al moverse los pistones de forma alternativa, el gas retorna del cilindro frío al caliente, donde se incrementa su temperatura y presión.

En las máquinas Stirling dotadas con regenerador, este acumula parte del calor durante el calentamiento isocórico, evitando que fluya hacia el pistón frío. De esta forma, el fluido de trabajo llega a menor temperatura y el salto térmico es mayor. En la fase opuesta, cuando el fluido se desplaza del foco frío al caliente, este recoge la temperatura acumulada en el regenerador y llega al foco caliente a mayor temperatura. El regenerador es un elemento que aumenta en gran medida el rendimiento en las máquinas Stirling.

2.4. Rendimiento

Para determinar el rendimiento termodinámico teórico del ciclo de trabajo Stirling, tenemos que analizar el calor transferido en cada fase.

Para ello consideramos que:

- 1) El gas se encuentra siempre a una temperatura inicial fría T_1 y una temperatura final caliente T_2 .
- 2) El gas parte de un volumen inicial V_1 hasta un volumen final V_2 más pequeño.

Las fases de trabajo del ciclo Stirling son las siguientes:

- **Fase 1 a 2. Expansión isotérmica:** $Q_{1-2} = n \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln(V_2/V_1)$
- **Fase 2 a 3. Aportación de calor isocórico:** $Q_{2-2'} = n \cdot C_v \cdot (T_2 - T_1)$
- **Fase 3 a 4. Compresión isotérmica:** $n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln(V_2/V_1)$
- **Fase 4 a 1. Rechazo de calor isocórico:** $n \cdot C_v \cdot (T_2 - T_1)$

El aporte de calor ocurre en las fases 1-2 y 2-3, así que el calor absorbido es:

$$Q_{\text{abs}} = n \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln(V_2/V_1) + n \cdot C_v \cdot (T_2 - T_1)$$

El rechazo de calor ocurre en las fases 3-4 y 4-1, así que el calor rechazado es:

$$Q_{\text{rech}} = n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln(V_2/V_1) + n \cdot C_v \cdot (T_2 - T_1)$$

El rendimiento del ciclo Stirling es:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{\text{rechazado}}}{Q_{\text{absorbido}}} = 1 - \frac{n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln(V_2/V_1) + n \cdot C_v \cdot (T_2 - T_1)}{n \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln(V_2/V_1) + n \cdot C_v \cdot (T_2 - T_1)}$$

$$\text{Finalmente; } \eta_{\text{ciclo Stirling}} = 1 - \frac{T_{\text{fría}}}{T_{\text{caliente}}}$$

El rendimiento termodinámico del ciclo Stirling es el rendimiento de Carnot. En casos prácticos, considerando un regenerador con rendimiento cercano al 100%, el rendimiento del ciclo Stirling regenerativo es del 80% del rendimiento de Carnot. Este valor se ha obtenido con ensayos en motores reales.

$$\eta_{\text{ciclo Stirling real}} \approx 0,8 * \eta_{\text{Carnot}} = 0,8 * \left(1 - \frac{T_{\text{fría}}}{T_{\text{caliente}}} \right)$$

Como ejemplo, un motor Stirling real, que opere con aire en el foco cálido a 800°C y a 15°C en el foco frío, obtendrá un rendimiento de: $\eta_{\text{real}} = 0,8 * \left(1 - \frac{15+273.16}{800+273.16} \right) = 58,5\%$

2.5. Potencia

Se puede aproximar la potencia teórica entregada por un motor Stirling gracias a la fórmula de Beale. Esta fórmula se ha desarrollado a partir de ensayos experimentales en multitud de motores reales.

$P = B \cdot V \cdot f \cdot p_m$, donde P es la potencia que entrega el motor Stirling expresada en vatios. B es el número de Beale (ver Tabla 1 e ilustración 2-8). V es el volumen barrido, en cm³, por el pistón de trabajo. f es la frecuencia de giro del motor, expresada en revoluciones por segundo. Finalmente, p_m es la presión media del ciclo de trabajo, expresada en bares.

Temperatura del foco caliente	600K	800K	1000K	1200K
Nº Beale (motor muy optimizado)	0,008	0,017	0,025	0,03
Nº Beale (motor poco optimizado)	0,002	0,006	0,009	0,01

Tabla 1. Número de Beale en función de la optimización del motor y la temperatura del foco caliente

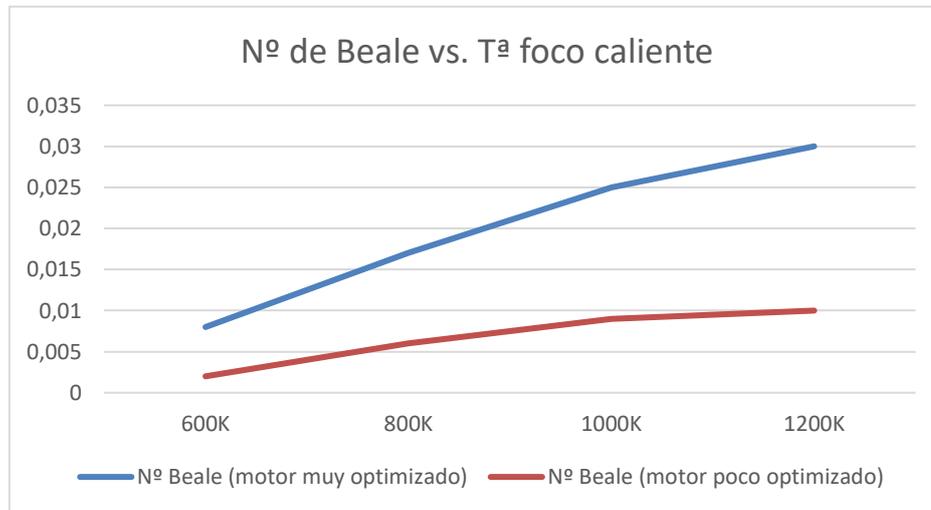


Ilustración 2-8. Gráfica Nº Beale vs Temperatura foco caliente

En el gráfico superior se compara el número de Beale en las ordenadas, con la temperatura del foco caliente en el eje de las abscisas. La línea azul representa el número de Beale de motores muy bien optimizados, con volúmenes muertos mínimos y sin fugas de aire. La línea roja representa el número de Beale de motores poco optimizados, con problemas de estanqueidad i un volumen considerable sin barrer.

2.6. Versatilidad

Si hay una característica que hace único al motor Stirling es su reversibilidad. De hecho, es la única máquina térmica reversible: Al aplicarle calor (una diferencia de temperatura, ΔT^a), este genera movimiento rotativo, proceso que puede invertirse. Al aplicar movimiento rotativo al eje, las caras frías y calientes sufrirán una caída y aumento de su temperatura, respectivamente.

Formas de uso del motor Stirling:

- Como motor alimentado por combustibles fósiles: Al ser un motor de combustión externa, se puede quemar combustible de cualquier tipo en la parte exterior del motor. Madera, gasolina, carbón, combustibles nucleares, etc. El calor producido se transmite a la parte interna del motor, donde se transforma en energía mecánica. Una vez convertida en energía mecánica, se puede

utilizar para mover ruedas, engranajes, hélices, etcétera. Así como utilizarlo como generador eléctrico.

- Como motor alimentado por combustibles renovables: Para que el motor Stirling se mueva, tan solo necesita un gradiente térmico. La concentración de luz solar en el foco caliente del motor Stirling se utiliza en centrales térmicas solares para generar electricidad mediante un alternador acoplado a su eje. Cada día encontramos más parques solares de este tipo en plantas de pequeña y mediana potencia. La luz del sol se enfoca sobre el foco caliente del motor Stirling mediante un disco parabólico, el movimiento del eje se transforma en electricidad mediante un generador y se transmite a la red eléctrica.



Ilustración 2-9. Generador de disco Stirling

- También se puede utilizar para aprovechar calor sobrante. Calor geotermal, o calor residual en motores de combustión interna o sistemas de refrigeración. La cogeneración con máquinas Stirling tiene gran importancia y utilidad. Es donde la mayoría de los motores Stirling se utilizan hoy en día.
- Como bomba de calor y sistema de refrigeración. Al aplicarle movimiento al eje del motor, obtenemos una diferencia de temperatura en ambas caras de la máquina. Aprovechando que estas son las únicas máquinas térmicas reversibles, los motores Stirling se usan hoy en día en sistemas de refrigeración a muy bajas temperaturas, inclusive en criogenización. Las podemos utilizar para obtener aire u otros fluidos a temperaturas más altas y más bajas que la temperatura ambiente. Desde los años 50, la empresa Philips apostó por sistemas de refrigeración basados en el ciclo Stirling, pues tiene mayor rendimiento que los basados en el ciclo Rankine para temperaturas seriamente bajas. Encontramos sistemas de refrigeración Stirling cuando las temperaturas necesarias son criogénicas. Desde la refrigeración de circuitos electrónicos, hasta el estudio y uso de superconductores, pasando por necesidades médicas y militares. Los refrigeradores Stirling más modernos consiguen alcanzar temperaturas de 20K, suficiente para licuar el aire. Debido a que son más simples, baratas y eficientes que los refrigeradores por compresión de gas, las máquinas Stirling se usan en la industria farmacéutica, investigación, militar, productores de gases licuados, electrónica e industria aeroespacial.



Ilustración 2-10. Foco frío en motor Stirling movido por maquina asíncrona

2.7. Tipos de motores Stirling

Existen diversas formas de clasificar los motores Stirling, según sus características de construcción, funcionamiento y geometría:

Según el escenario de operación:

- **Simple efecto/doble efecto**

Según el modo de acoplamiento de los cilindros en el motor:

- **Alpha:** Este motor consta de foco caliente-regenerador-foco frío, todo ello conectado en serie. En el motor Alpha, el pistón desplazador y el de trabajo se encuentran en cilindros distintos.

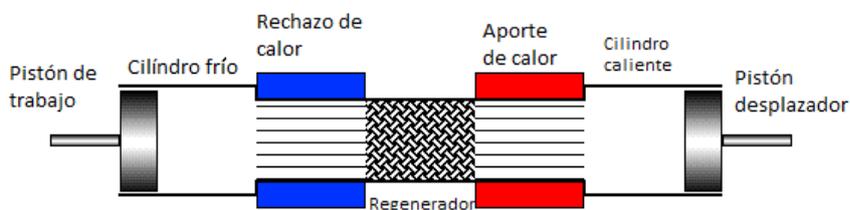


Ilustración 2-11. Esquema de motor Stirling Alpha, en configuración lineal

Es la configuración de máquina Stirling con mayor relación potencia/peso. Como desventajas, destaca el calor perdido en la transferencia de gases de un cilindro a otro, pues esta ha de hacerse mediante tubos.

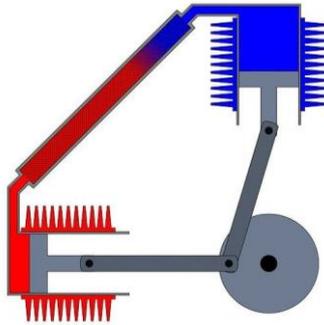


Ilustración 2-12. Esquema de motor Stirling Alpha, en configuración real

- **Beta:** Esta tipología de motor fue la diseñada y construida por Robert Stirling en 1816. Su principal característica es que el pistón de trabajo y el desplazador están situados en el mismo cilindro.

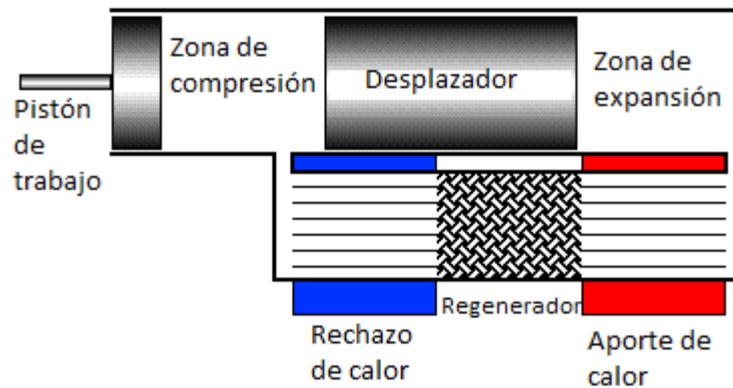


Ilustración 2-13. Esquema de motor Stirling Beta

Al tener un solo cilindro, las pérdidas de calor con el ambiente se reducen, aunque hay que tener en cuenta que el foco frío y el foco caliente tienden a equilibrar sus temperaturas, así que es importante contar con una buena refrigeración.

Como principal inconveniente, el pistón desplazador atraviesa el pistón de trabajo. Esto crea problemas de estanqueidad y lo hace más difícil de construir que las configuraciones Alpha y Gamma.

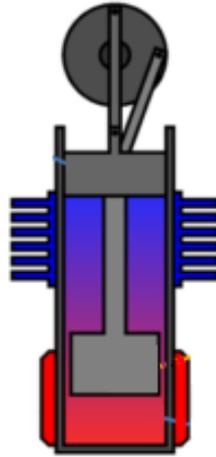


Ilustración 2-14. Motor Stirling Beta, apréciese el paso del pistón desplazador por dentro del de trabajo

- Gamma:** La configuración Gamma es similar a la Beta, con la diferencia de tener los pistones desplazador y de trabajo en cilindros diferentes. Son más simples de construir y no tienen el problema de estanqueidad de los motores Beta. Al tener dos cilindros, el foco frío y el caliente están separados y es más difícil que sus temperaturas tiendan a equilibrarse. Como desventaja, hay volúmenes muertos (zonas no barridas) algo mayores que en las configuraciones previamente vistas. Lo cual conlleva a una pérdida de rendimiento. En esta configuración, parte de la expansión tiene lugar en la zona de compresión, lo que conduce a una pérdida de potencia efectiva.

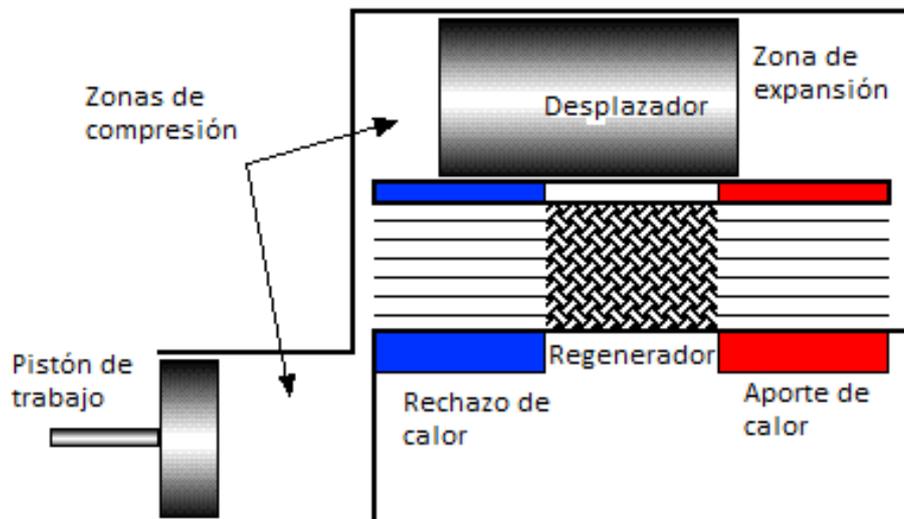


Ilustración 2-15. Esquema de motor Stirling Gamma

Cabe destacar, que esta tipología es la de los **motores de baja diferencia de temperatura**. Esto se consigue con un diámetro del pistón desplazador mucho mayor que el de trabajo. No son motores que generen gran potencia, pero se ha conseguido que pequeñas maquinas Stirling Gamma se muevan con solo 4°C de gradiente térmico entre ambas caras del motor. Normalmente los motores de baja diferencia térmica se emplean como maquetas didácticas.



Ilustración 2-16. Esquema de motor Stirling Gamma de baja diferencia de temperatura

Según el modo de acople de los pistones:

- **Acople gaseoso:** También conocido como pistón libre. Estos motores no son empleados debido a la dificultad constructiva, la poca fiabilidad del mecanismo y la dificultad para aprovechar su potencia debido a que sus émbolos se descoordinan bajo variaciones en la carga del motor, ya que no tienen ninguna unión física entre ellos.

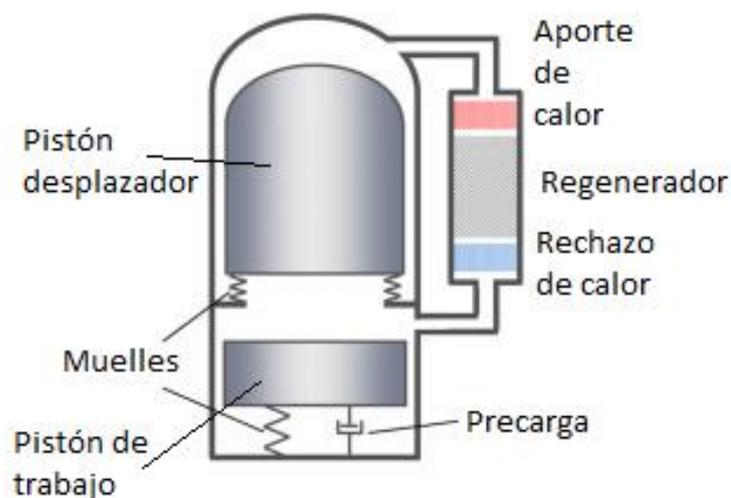


Ilustración 2-17. Esquema de motor Stirling de pistón libre

- **Acople mecánico:**
 1. Mecanismo biela-manivela: Es el mecanismo más conocido y utilizado en este tipo de motores.

2. Mecanismo Swash Plate

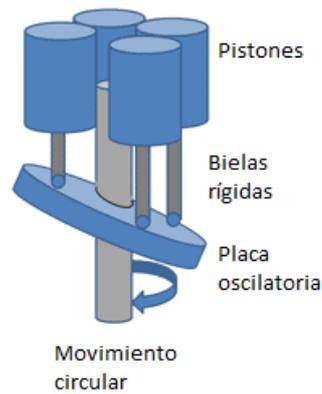


Ilustración 2-18. Mecanismo Swash Plate

3. Mecanismo rómbico: Extendido en motores Stirling Beta de alta potencia. El mecanismo es robusto y duradero, como contra, es más costoso de fabricar que el biela-manivela, de ahí que no esté tan extendido.

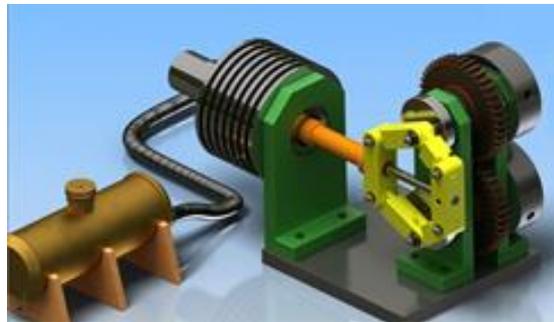


Ilustración 2-19. Mecanismo rómbico empleado en motor Stirling Beta

4. Mecanismo de Ross:

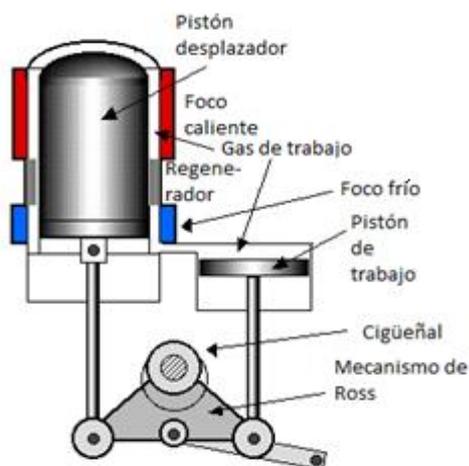


Ilustración 2-20. Esquema del mecanismo de Ross acoplado en motor tipo Gamma

2.8. Fluidos de trabajo

Las maquinas Stirling operaron hasta bien entrado el del siglo XX únicamente con aire a presión atmosférica. Esto las hacía de gran tamaño y poca potencia, aunque más seguras que las máquinas de vapor. En la década de 1930, la casa Philips se interesó en las máquinas Stirling. Hicieron estudios sobre fluidos de trabajo y distintas condiciones de operación. Probaron motores Stirling con aire presurizado y posteriormente con varios tipos de gases a distintas presiones y a amplios rangos de temperatura. Comprobaron que, al aumentar la presión del gas de trabajo, aumenta su rendimiento, así como substituir el aire por otros gases.

Las condiciones que ha de poseer el fluido de trabajo de un motor Stirling son:

- **Compresibilidad:** El fluido de trabajo tiene que poder adaptarse rápidamente a cambios de presión provocados por los émbolos, de modo que los líquidos quedan descartados para fluido de trabajo en este tipo de motores ya que no son compresibles. Los gases son los únicos fluidos capaces de operar en un motor Stirling gracias a su compresibilidad.
- **Alta conductividad térmica:** El gas de trabajo ha de poder intercambiar calor fácilmente con su entorno en las distintas fases del ciclo.
- **Baja viscosidad:** Una baja viscosidad garantiza que el fluido se deformará con facilidad y celeridad para adaptarse rápidamente a los cambios de volumen y ocupar todo el espacio disponible.
- **Baja densidad:** Un gas poco denso disminuye las inercias dentro del motor Stirling.
- **Bajo calor específico:** Permite al gas absorber y ceder energía en menos tiempo.

Los gases no reactivos son los más estudiados y utilizados en la construcción de motores Stirling. Aire, helio e hidrogeno son los gases más ventajosos.

El **helio** es el gas más utilizado hoy en día en los motores Stirling comerciales. Como ventajas, genera una gran potencia específica y es inerte. Se suele emplear en máquinas Stirling de generación y cogeneración eléctrica, así como en submarinos. Lugares donde se requiere fiabilidad y alta seguridad.

Las ventajas del gas **hidrógeno** son la alta potencia específica que generan los motores que lo emplean. De hecho, es el único gas capaz de hacer competir a sus motores con máquinas de combustión interna. Es ligero y potente, características deseables en motores pequeños. Como contra, la peligrosidad de una posible fuga de gas junto a llamas y altas temperaturas. Debido al reducido tamaño de la molécula H₂, esta es capaz de fugarse a través de los poros del metal que lo contiene. El gas hidrogeno a altas presiones y temperaturas es capaz de penetrar en los metales y fragilizarlos. Puede agrietar pistones, cilindros y calentadores.

Hasta bien entrado el siglo veinte, el **aire** fue el único gas empleado como fluido de trabajo. Hoy en día es capaz de competir con el helio en aplicaciones de poca potencia específica y velocidad. Es muy útil para

motores que trabajan largas temporadas sin parar, ya que es el gas que menos se escapa del motor de los estudiados, también es fácil de reemplazar.

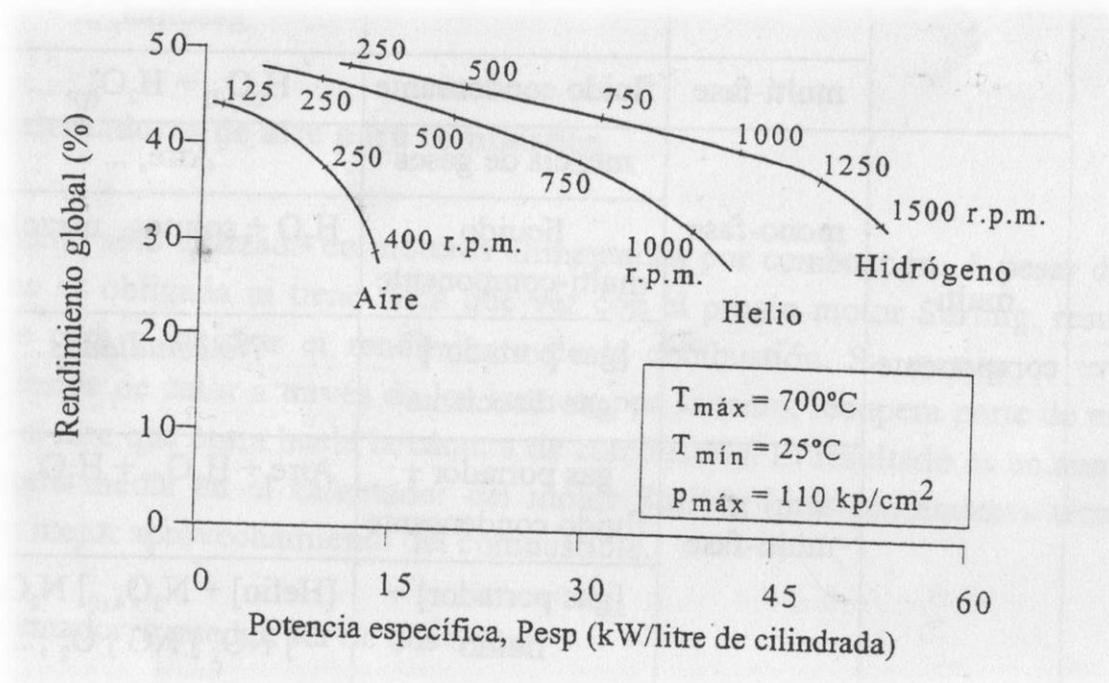


Ilustración 2-21. Gráfica Rendimiento vs Potencia específica¹

El gráfico superior lo publicó la casa Philips, en él se muestran los resultados en ensayar aire, helio e hidrógeno a iguales temperaturas máximas y mínimas, e igual presión máxima. De esta comparación observamos que, a menores velocidades, mayor rendimiento. Este cae bruscamente a partir de un cierto número de revoluciones. Y que a la misma velocidad angular: $\eta_{\text{hidrogeno}} > \eta_{\text{helio}} > \eta_{\text{aire}}$.

Al aumentar la potencia específica, el rendimiento disminuye.

Al aumentar las revoluciones, la potencia específica se incrementa hasta su límite. A igual velocidad de giro: $P_{\text{esp aire}} < P_{\text{esp helio}} < P_{\text{esp hidrógeno}}$. Así que, para entregar una misma potencia, el gas hidrógeno es el que necesitara menor volumen, por consiguiente, los motores a hidrogeno son más pequeños que los de helio y aire, respectivamente.

¹ Jesús A. Álvarez Flores, Ismael Callejón i Agramunt, Pere Roca i Carles. 1997. El motor Stirling, Barcelona: Publicacions d'Abast.

2.9. Influencia de los parámetros principales en el rendimiento del motor

A continuación, se presentan una serie de criterios que afectan a las prestaciones del motor Stirling. Potencia mecánica y rendimiento se ven afectados por los siguientes factores.

Velocidad angular: Partiendo de muy bajas velocidades, el aumento de la velocidad de giro del eje del motor provoca un aumento en la potencia que éste desarrolla, hasta llegar al punto donde se alcanza la potencia máxima. A partir de dicho punto, por mucho que aumentemos la velocidad de giro, la potencia disminuye. Respecto al rendimiento, éste presenta una curva también de forma convexa, el rendimiento se incrementa hasta su máximo, a partir de ese punto, por mucho que se aumente la velocidad de giro, el rendimiento solo disminuye. Conviene explotar el motor en el rango de revoluciones situado entre η_{\max} y P_{\max} . (obsérvese la ilustración 2-22).

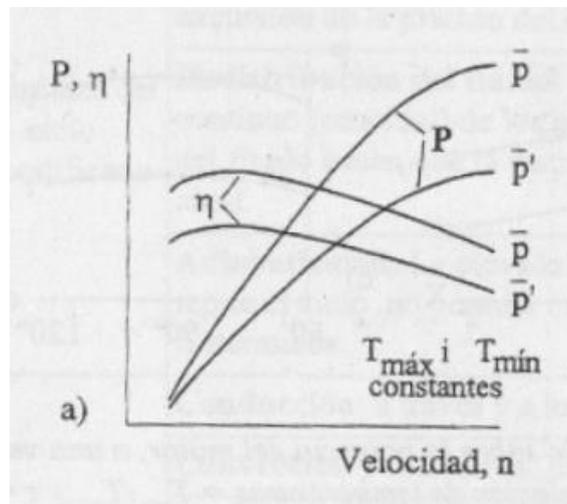


Ilustración 2-22. Gráfica Presión y Rendimiento vs Velocidad angular²

Presión media del ciclo: Idealmente, la presión media del ciclo termodinámico tendría que ser proporcional a la potencia desarrollada por el motor. En la realidad no es así. El aumento de presión conlleva a pérdidas de rendimiento por fricción y complica la estanqueidad del motor. El resultado es parecido al caso anterior. Las gráficas reales muestran un rango de presiones entre η_{\max} y P_{\max} , donde es conveniente que trabaje el motor.

² Jesús A. Álvarez Flores, Ismael Callejón i Agramunt, Pere Roca i Carles. 1997. El motor Stirling, Barcelona: Publicacions d'Abast.

Temperaturas de los focos: En el apartado 2.4. Rendimiento y 2.5. Potencia, se reflejó que un aumento en la temperatura en el foco caliente provoca un aumento en la potencia desarrollada y en el rendimiento. Al disminuir la temperatura del foco frío se obtiene el mismo resultado. Por el contrario, disminuir la temperatura del foco caliente y aumentarla en el foco frío, provoca una pérdida de potencia y rendimiento. A mayor gradiente térmico entre los focos caliente y frío, mayor potencia y rendimiento se obtienen del motor.

Los siguientes parámetros de diseño también tienen importancia en la potencia y rendimiento desarrollados:

Cilindrada: En las máquinas Stirling se denomina cilindrada a la diferencia de volúmenes que se somete al fluido de trabajo en un ciclo. La relación entre cilindrada y potencia prácticamente lineal, a mayor cilindrada, más potencia se obtiene de un motor. El rendimiento teóricamente no se ve afectado por este criterio, aunque en casos prácticos se observa que pequeños modelos demostrativos o didácticos no generan el mismo rendimiento que sus equivalentes de mayores dimensiones.

Ángulo de desfase: El ángulo de desfase en el cigüeñal del motor Stirling se encuentra entre 60° y 120° , según el tipo y características de cada motor. Entre esos ángulos se obtiene la máxima potencia que el motor es capaz de desarrollar. Hoy en día, para obtener el ángulo de desfase óptimo se puede recurrir a programas de cálculo y a simulación informática.

Volumen muerto: El volumen muerto es aquel volumen que no es barrido. La relación volumen muerto / volumen total de la cámara de expansión es llamado X. Aumentar X conlleva una pérdida de potencia, por lo que en el diseño del motor Stirling se intenta reducir X al mínimo posible. Este problema afecta en mayor medida a las máquinas de tipología Gamma, debido a su geometría, suelen presentar volúmenes no barridos que disminuyen la potencia.

3. Comparativa con los motores de combustión interna alternativos

Los motores que generalmente se emplean en grandes buques, ya sea como motores principales o como auxiliares, son los motores alternativos de combustión interna. Una comparativa entre este tan conocido grupo de máquinas y los motores Stirling facilitará la tarea de ubicar los motores Stirling en buques. Previamente a la comparativa, veremos los distintos tipos de máquinas térmicas agrupadas por cercanía.

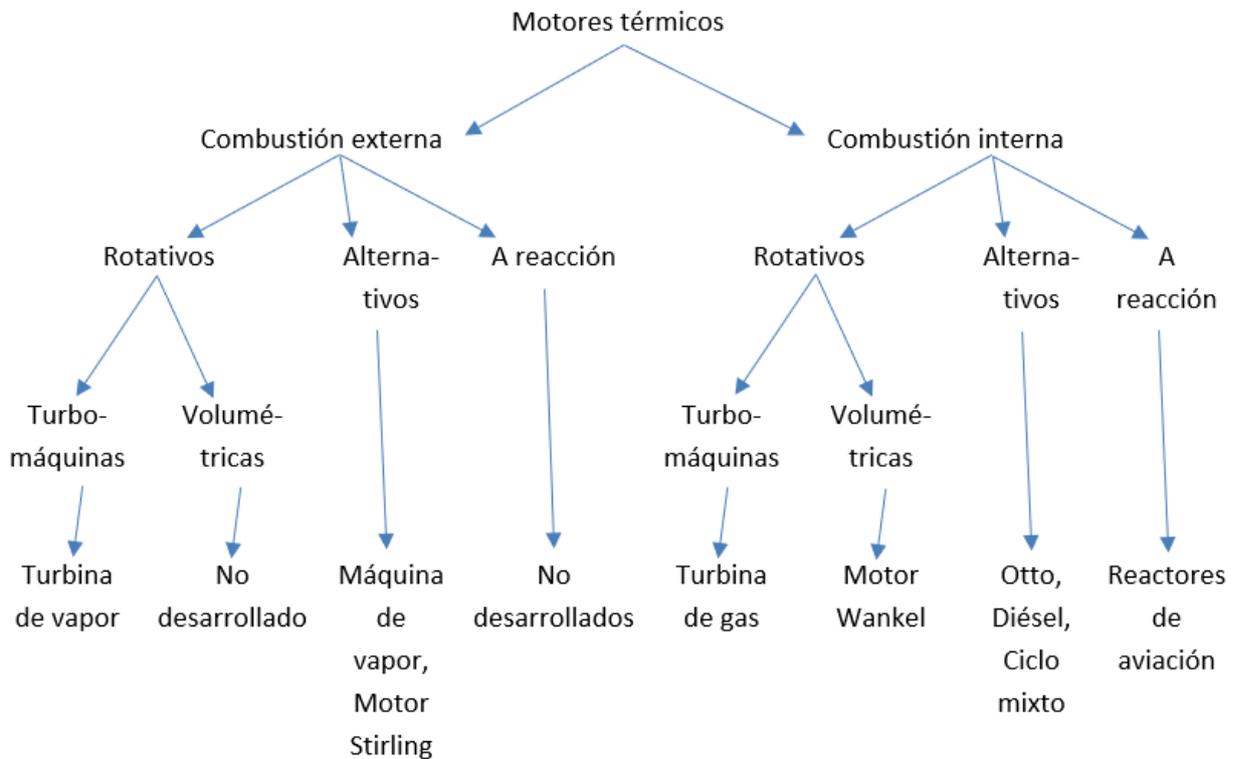


Tabla 2. Familia del motor térmico

Aunque la máquina Stirling es de combustión externa y los motores Otto y Diésel son de combustión interna, ambos son motores alternativos, por lo cual no son tan distintos. De hecho, poseen cilindros, pistones, bielas y cigüeñales muy parecidos entre sí.

Como se ha expuesto en el apartado 1. Historia, la máquina Stirling no experimentó mejoras desde finales del siglo XIX, y quedó prácticamente olvidada hasta mediados del siglo XX.

Los motores Stirling de hasta bien entrado el siglo XX no eran capaces de competir con los motores de combustión interna alternativos. No obstante, debido a la crisis del petróleo sufrida en la década de 1970, el mundo se dio cuenta de la alta dependencia del crudo y de la necesidad de buscar otras fuentes de energía para satisfacer la demanda mundial y buscar una alternativa a los motores que desde principios de siglo movían al mundo. Durante las décadas 70 y 80 del siglo anterior, la NASA mostró un gran interés por estas máquinas. Invirtió gran cantidad de tiempo y dinero en investigación y desarrollo de estos motores para ver que fines podrían dárseles, sobre todo pensado en aplicaciones espaciales, donde la generación eléctrica vía motores de combustión interna queda descartada, y con las limitaciones de la época en almacenaje y generación de energía eléctrica. Dedicaron grandes esfuerzos al estudio teórico

de estas máquinas a partir del desarrollo y las mejoras de Philips. Tras varios años, diseñaron y construyeron motores Stirling pensados para comprobar sobre el terreno práctico si las maquinas Stirling podían ofrecer mejoras respecto los motores de combustión interna.

Para ello fabricaron motores Stirling tipo Beta, tomando el testigo donde lo dejo Philips. Estos motores, de diseño moderno, y contruidos con la técnica más novedosa, fueron un salto abismal respecto a los motores de mismo ciclo de trabajo existentes hasta la fecha.



Ilustración 3-1. Motor Stirling en un automóvil³

La NASA, tras convertir varios coches y furgonetas de motores de cicló Diésel y Otto, a motores Stirling, y tras un periodo de un año de uso, vieron que estos presentaban las siguientes ventajas:

Los motores Stirling simplifican el motor, pasando de 4 o más bujías a una sola (en el caso de comparativa con ciclo Otto). Al ser la combustión mucho más limpia, se simplifica el catalizador. El turbocompresor también se elimina, al ser un motor de ciclo cerrado. El aceite se degrada más lentamente al no estar en contacto con la explosión ni con sus residuos ni ácidos, lo cual disminuye los costes por mantenimiento y alarga los periodos entre revisiones. La conducción es más tranquila, al generar menos vibraciones y ruidos que los motores de combustión interna.

A continuación, se exponen los datos obtenidos de la comparativa del vehículo Chevrolet Celebrity de 1985 con motor Otto original, contra el mismo vehículo propulsado por un motor Stirling:

³ Defense Visual Information Distribution Service. 2009. <https://www.dvidshub.net/image/859381/mod-ii-automotive-stirling-engine>

Comparativa Vehículo Stirling vs. Otto			
	Vehículo	Stirling	Otto
Motor	Tipo	4 cilindros en V (Beta)	4 cilindros en línea
	Cilindrada [L]	0,5	2,5
	Potencia máxima [cv]	84	93
	Torque máximo	212,2N*m a 1000rpm	182N*m a 2800rpm
	Velocidad de giro máxima [rpm]	4000	4800
	Aceleración de 0-100km/h [s]	12,8	13,4
Consumos	Autopista [l/100km]	4	5,8
	Mixto [l/100km]	5,7	7,6
	Urbano [l/100km]	7,1	9
	Aceleración de 0-100km/h [s]	12,8	13,4

Tabla 3. Comparativa motor Stirling vs. Otto en automóvil⁴

Tras comparar motores Stirling con motores Otto de casi igual potencia, se concluye que las maquinas Stirling tienen mayor par motor. Esto ocurre gracias a que los motores Stirling giran a velocidades bajas, raramente superan las 2500rpm, mientras que los motores de ciclo Otto pueden trabajar cómodamente a 6000rpm en motores estándares y llegar a las 18000rpm en el caso de motores de competición.

Otra ventaja de los motores Stirling frente a los motores de ciclo Otto, es que, aun desarrollando mayor torque en el cigüeñal, estos no requieren de una mecánica tan sofisticada ni robusta. Gracias a que los motores Stirling de 4 cilindros solo presentan una diferencia de par motor entorno al 6%, comparado con un motor gasolina de 4 tiempos de igual cilindrada y numero de cilindros, este presenta variaciones en el par cercanas al 200%. Esto hace que las maquinas Stirling sean mucho más silenciosas, tengan menores vibraciones, no sufran sobretensiones durante el funcionamiento ni fatigas, y reduce significativamente el tamaño del volante de inercia.

Respecto a la potencia específica del motor (KW/Kg), la cual nos indica cuan bien aprovechado está el peso del motor, los motores Stirling presentan una relación potencia/volumen inferior a los motores Otto y superior a los de Diésel. Respecto a su arquitectura, los motores Stirling presentan un menor volumen y peso en el bloque motor, por el contrario, el sistema de refrigeración es mayor que en los motores de combustión interna, lo que se traduce en radiadores de mayor superficie, mayor caudal de fluido refrigerante necesario o menor salto térmico.

Entre otras desventajas, los motores Stirling son mucho más caros de producir que los motores de combustión interna. El precio aproximado de fabricación del motor Stirling, es aproximadamente el doble de uno de igual potencia de ciclo Diésel. El economizador es una pieza cara y necesaria, que llega a costar hasta el 30% del valor total del motor. El hecho de ser una máquina de combustión externa hace que el tiempo para el cambio de régimen sea mucho más lento que en motores de combustión interna, así como el tiempo de arranque. El calor debe ser transferido de la fuente (quemador, agua caliente, etc.) hasta el

⁴ Noel P. Nightingale. 1986. Automotive Stirling Engine, Cleveland, página 38

gas de trabajo en el foco caliente, lo cual requiere tiempo. Los motores de combustión interna no tienen ese problema, el arranque no lleva más de un par de segundos y el cambio de régimen es mucho más rápido, así que su uso en automóviles es complejo, no solo por el factor económico, sino por la comodidad de uso. En el caso de acoplar el motor Stirling a un vehículo con marchas, el desgaste del embrague es más rápido, o se debería recurrir a embragues más complejos, ya que el acoplamiento entre motor y la caja de cambios ha de ser muy suave. Lo cual afecta seriamente al coste de mantenimiento de estas piezas. En trenes y barcos, vehículos con lentos y predecibles cambios de régimen, estas máquinas sí tienen más futuro que en automoción.

4. Método de cálculo de parámetros para motores Stirling

Para poder comprobar si los motores Stirling son realmente viables, debemos ser capaces de calcular sus dimensiones, así como potencia, velocidad y rendimiento.

Desde la invención de los primeros motores fue necesario hallar métodos de cálculo para conocer las características de funcionamiento de un motor, antes de que este fuese construido. Con el motor Stirling pasó lo mismo. Era necesario hallar un modo para poder calcular las características del motor, sus condiciones de trabajo, necesidades refrigerativas y demás parámetros, antes de que este fuera construido. Un buen diseño es la base para obtener el motor buscado, así que, poco después del nacimiento del motor Stirling, ingenieros y constructores buscaron métodos para poder saber qué características tendría la máquina antes de ser construida. Ya a finales del S.XIX, había métodos para aproximar las condiciones de trabajo y la geometría de los motores Stirling, en función de los parámetros deseados de la máquina. Con el tiempo, y con las herramientas de cálculo y simulación de las que hoy en día disponemos, se puede aproximar de forma muy certera el comportamiento de una maquina Stirling antes de construirla.

4.1. Teoría de Schmidt

La teoría de Schmidt es un método de cálculo que permite aproximar, de forma muy cercana a la realidad, las características de un motor Stirling, ya sea de tipología Alpha, Beta o Gamma antes de su construcción. Esta teoría fue propuesta en 1872 por Gustav Schmidt, de la universidad de Praga. Gracias a su sencillez es fácil de aplicar, fabricantes de máquinas Stirling e investigadores en este campo la usan para simular mediante ordenador el comportamiento del motor. Esto permite optimizar parámetros del motor y mejorar sus prestaciones antes de ser construido.

La teoría se basa en la compresión y expansión del gas de trabajo de forma isoterma. Los datos utilizados son fácilmente obtenibles, como temperaturas de ambos focos y valores conocidos por la geometría del motor diseñado. Esta teoría es aplicable para motores Stirling de tipo Alpha, Beta y Gamma.

Mediante el diagrama Presión/Volumen, podemos estudiar las características de trabajo de los motores térmicos. Para el motor Stirling, una vez se ha decidido las temperaturas de los focos y volúmenes de los cilindros, la presión de trabajo la obtendremos mediante la siguiente ecuación:⁵

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

Para poder usar esta hipótesis, asumimos las siguientes condiciones de trabajo:

- a) Asumimos que el gas de trabajo es un gas ideal.
- b) El rendimiento del regenerador es del 100%.

⁵ Formulas y Tabla 4 obtenidas de "Koichi Hirata. (s/f). Schmidt Theory for Stirling Engines"

- c) Las fases de expansión y compresión son isotermas.
- d) No hay fugas de gas en el motor.
- e) La presión interna es igual en cualquier punto del motor.
- f) La temperatura del gas en el interior del regenerador es una media entre la temperatura de los focos frío y caliente.
- g) Los volúmenes de expansión y compresión varían según curvas sinusoidales, gracias al movimiento rectilíneo generado por el mecanismo biela-manivela.

La siguiente tabla muestra la simbología usada en la teoría de Schmidt:

Parámetro	Abreviación	Unidad
Presión del motor	P	Pa
Volumen barrido por el pistón de expansión (caliente)	V_{se}	m^3
Volumen barrido por el pistón de trabajo (frío)	V_{sc}	m^3
Volumen del PMS en el cilindro de expansión	V_{de}	m^3
Volumen del PMS en el cilindro de trabajo	V_{dc}	m^3
Volumen del regenerador (economizador)	V_r	m^3
Volumen de expansión momentáneo	V_e	m^3
Volumen de compresión momentáneo	V_c	m^3
Volumen total momentáneo	V	m^3
Masa total del gas de trabajo	m	kg
Constante universal de los gases	R	J/kg*K
Temperatura en el cilindro de expansión	T_h	K
Temperatura en el cilindro de compresión	T_c	K
Temperatura del regenerador	T_r	K
Ángulo de desfase	dx	radianes
Ratio de temperaturas	t	-
Ratio de volumen barrido	v	-
Ratio de volumen muerto	X	-
Velocidad del motor	n	Hz
Energía indicada de expansión	W_e	J
Energía indicada de compresión	W_c	J
Energía neta	W_i	J
Potencia indicada de expansión	L_e	W
Potencia indicada de compresión	L_c	W
Potencia neta	L_i	W
Rendimiento	e	-

Tabla 4. Abreviaciones y unidades usadas en la teoría de Schmidt

4.1.1. Ecuaciones para el motor Alpha

Los volúmenes de expansión y compresión de los cilindros vienen dados por el ángulo de giro del cigüeñal del motor. Definimos la posición inicial (0°) como la que tiene al encontrarse el pistón de trabajo en el punto muerto superior, y el ángulo instantáneo como α .

El volumen de expansión instantáneo (V_e) viene dado por la siguiente expresión:

$$V_e = \frac{V_{se}}{2} * (1 - \cos\alpha) + V_{de} \quad (2)$$

En la fórmula encontramos un coseno gracias a la condición de trabajo g.

El volumen de compresión instantáneo (V_c) viene dado por la siguiente expresión, observamos el volumen barrido por el pistón de trabajo (V_{sc}) y la expansión de volumen muerto en el pistón de trabajo (V_{dc}):

$$V_c = \frac{V_{sc}}{2} * (1 - \cos(\alpha - dx)) + V_{dc} \quad (3)$$

El volumen total instantáneo se calcula como el sumatorio de los volúmenes de desplazamiento, trabajo y de regeneración:

$$V = V_e + V_r + V_c \quad (4)$$

Asumiendo las condiciones a, c y d, se calcula la masa de gas en el interior del motor mediante la presión, temperatura y volumen interno. R es constante.

$$m = \frac{P*V_e}{R*T_e} + \frac{P*V_r}{R*T_r} + \frac{P*V_c}{R*T_c} \quad (5)$$

El ratio de temperaturas (t), el ratio de volumen barrido (v) y otros ratios volumétricos, se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$t = \frac{T_c}{T_e} \quad (6)$$

$$v = \frac{V_{sc}}{V_{se}} \quad (7)$$

$$X_{de} = \frac{V_{de}}{V_{se}} \quad (8)$$

$$X_{dc} = \frac{V_{dc}}{V_{se}} \quad (9)$$

$$X_r = \frac{V_r}{V_{se}} \quad (10)$$

La temperatura del regenerador (T_r), se obtiene mediante la siguiente ecuación, asumiendo la condición f:

$$T_r = \frac{T_e + T_c}{2} \quad (11)$$

Al reemplazar en la ecuación (5), con las ecuaciones de (6) a (10), se concluye que la masa total de gas es:

$$m = \frac{P}{R*T_c} (tV_e + \frac{2vV_r}{1+t} + V_c) \quad (12)$$

Mediante las ecuaciones (2) y (3), la ecuación (12) se transforma en la ecuación (13):

$$m = \frac{PV_{se}}{2RTc} (S - B\cos(\alpha - a)) \quad (13)$$

Se obtiene a, S y B:

$$a = (\arctan) \frac{v \cdot \sin dx}{t + \cos dx} \quad (14)$$

$$S = t + 2tXde + \frac{4tXr}{1+t} + v + 2Xdc \quad (15)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2tv \cdot \cos dx + v^2} \quad (16)$$

Partiendo de la ecuación (13), se calcula la presión del motor:

$$P = \frac{2mRTc}{V_{se}(S - B \cdot \cos(\Phi - a))} \quad (17)$$

Llegado este punto, la presión media se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_{mean} = \frac{1}{2\pi} \oint P dx = \frac{2mRTc}{V_{se} \sqrt{S^2 - B^2}} \quad (18)$$

C se define con la siguiente ecuación:

$$c = \frac{B}{S} \quad (19)$$

Así que, la presión instantánea del motor, basado en la presión media, es calculada mediante la siguiente ecuación:

$$P_{inst} = \frac{P_{mean} \sqrt{S^2 - B^2}}{S - B \cos(\alpha - a)} = \frac{P_{mean} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(\alpha - a)} \quad (20)$$

Con la ecuación (17), cuando el $\cos(\alpha - a) = -1$, la presión del motor es la mínima (P_{min}). Se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_{min} = \frac{2mRTc}{V_{se}(S+B)} \quad (21)$$

Basándose en la mínima presión, la presión media del motor es:

$$P = \frac{P_{min}(S+B)}{S - B \cos(\alpha - a)} = \frac{P_{min}(1+c)}{1 - c \cdot \cos(\alpha - a)} \quad (22)$$

De igual manera, cuando el $\cos(\alpha-a) = 1$, la presión dentro del motor es la presión máxima (P_{max}), y se obtiene la siguiente ecuación:

$$P = \frac{P_{max}(S-B)}{S-B\cos(\alpha-a)} = \frac{P_{max}(1-c)}{1-c*\cos(\alpha-a)} \quad (23)$$

Con las ecuaciones anteriores ya se puede obtener el diagrama Presión-Volumen del motor Stirling Alpha, así como diagramas de desfases entre volúmenes y Presión-Ángulo, entre otros.

4.1.2. Ecuaciones para el motor Beta

A continuación, se exponen las ecuaciones para el motor Stirling tipo Beta, algunas de ellas son compartidas con el motor de disposición Alpha:

$$V_e = \frac{V_{se}}{2} * (1 - \cos\alpha) + V_{de} \quad (24)$$

$$V_c = \frac{V_{se}}{2} * (1 - \cos\alpha) + \frac{V_{sc}}{2} * [1 - \cos(\alpha - dx)] + V_{dc} - V_b \quad (25)$$

En los motores de tipología Beta, el cilindro para el pistón desplazador y el de trabajo es el mismo. Así que hay una posición donde ambos pistones se superponen. En este periodo del ciclo, se crea un volumen de trabajo efectivo, llamado volumen de superposición (V_b). Dicho volumen se calcula mediante la siguiente formula:

$$V_b = \frac{V_{se}+V_{sc}}{2} - \sqrt{\frac{V_{se}^2+V_{sc}^2}{4} - \frac{V_{se}*V_{sc}}{2} * \cos dx} \quad (26)$$

El volumen total instantáneo es el siguiente:

$$V = V_e + V_c + V_r \quad (27)$$

La presión instantánea, basada en la presión media, así como las presiones máximas y mínimas se describen con la siguiente expresión:

$$P = \frac{P_{mean} \sqrt{1-c^2}}{1-c*\cos(\alpha-a)} = \frac{P_{min}*(1+c)}{1-c*\cos(\alpha-a)} = \frac{P_{max}*(1-c)}{1-c*\cos(\alpha-a)} \quad (28)$$

Se definen los siguientes ratios, se observa que a excepción de X_b , a , S y B , el resto de ratios son idénticos a los del caso Alpha:

$$t = \frac{T_c}{T_e} \quad (29)$$

$$v = \frac{V_{sc}}{V_{se}} \quad (30)$$

$$Xb = \frac{Vb}{V_{se}} \quad (31)$$

$$Xde = \frac{Vde}{V_{se}} \quad (32)$$

$$Xdc = \frac{Vdc}{V_{se}} \quad (33)$$

$$Xr = \frac{Vr}{V_{se}} \quad (34)$$

$$a = (\arctan) \frac{v \cdot \sin dx}{t + \cos dx + 1} \quad (35)$$

$$S = t + 2tXde + \frac{4tXr}{1+t} + v + 2Xdc + 1 - 2Xb \quad (36)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2 * (t - 1) * v * \cos dx + v^2 - 2t + 1} \quad (37)$$

$$c = \frac{B}{S} \quad (38)$$

Con las ecuaciones anteriores ya se puede obtener el diagrama Presión-Volumen del motor Stirling tipo Beta, así como diagramas de desfases entre volúmenes y Presión-Ángulo, entre otros.

4.1.3. Ecuaciones para el motor Gamma

Las ecuaciones para el cálculo de los parámetros del motor Stirling tipo Gamma son muy similares a las vistas en los casos anteriores. Este motor presenta una disposición parecida al Alpha, con dos cilindros independientes para cada foco.

La ecuación para el cálculo del volumen instantáneo en el cilindro de expansión es la misma que en las otras tipologías estudiadas:

$$Ve = \frac{V_{se}}{2} * (1 - \cos \alpha) + Vde \quad (39)$$

$$Vc = \frac{V_{se}}{2} * (1 + \cos \alpha) + \frac{V_{sc}}{2} [1 - \cos(\alpha - dx)] + Vdc \quad (40)$$

$$V = Ve + Vc + Vr \quad (41)$$

Las ecuaciones para el cálculo de presión instantánea en cada punto, así como varios ratios, son iguales que las aplicadas en las otras tipologías de motores, exceptuando a y S:

$$P = \frac{P_{mean} \sqrt{1-c^2}}{1-c*\cos(\alpha-a)} = \frac{P_{min}*(1+c)}{1-c*\cos(\alpha-a)} = \frac{P_{max}*(1-c)}{1-c*\cos(\alpha-a)} \quad (42)$$

$$t = \frac{T_c}{T_e} \quad (43)$$

$$v = \frac{V_{sc}}{V_{se}} \quad (44)$$

$$X_{de} = \frac{V_{de}}{V_{se}} \quad (45)$$

$$X_{dc} = \frac{V_{dc}}{V_{se}} \quad (46)$$

$$X_r = \frac{V_r}{V_{se}} \quad (47)$$

$$a = (\arctan) \frac{v*\sin dx}{t+\cos dx-1} \quad (48)$$

$$S = t + 2tX_{de} + \frac{4tV_r}{1+t} + v + 2X_{dc} + 1 \quad (49)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2 * (t - 1) * v * \cos dx + v^2 - 2t + 1} \quad (50)$$

$$c = \frac{B}{S} \quad (51)$$

Con las ecuaciones anteriores ya se puede obtener el diagrama Presión-Volumen del motor Stirling, así como diagramas de desfases entre volúmenes y Presión-Ángulo, entre otros.

Para obtener la potencia y el rendimiento del motor para las tres tipologías de motor Stirling, se recurre a las siguientes formulas:

Trabajo del pistón de expansión:

$$W_e = \frac{P_m * V_{se} * \pi * c * \sin(a)}{1 + \sqrt{1-c^2}} \quad (52)$$

Trabajo del pistón de compresión:

$$W_c = \frac{P_m * V_{sc} * \pi * c * \sin(a)}{1 + \sqrt{1-c^2}} \quad (53)$$

Trabajo neto:

$$W_i = W_e - W_c \quad (54)$$

La potencia es el trabajo entre el tiempo requerido:

$$L_e = \frac{W_e}{t} = W_e * n \quad (55)$$

$$L_c = \frac{W_c}{t} = W_c * n \quad (56)$$

$$L_i = \frac{W_i}{t} = W_i * n \quad (57)$$

Finalmente, el rendimiento se calcula como la relación entre el trabajo generado respecto al trabajo aportado:

$$\eta = \frac{W_i}{W_e} \quad (58)$$

4.2. Simulación

Partiendo de una hoja de cálculo el blanco, se han programado las ecuaciones vistas en los apartados anteriores para la simulación de cada tipología de motor. De esta forma, introduciendo en la tabla una serie de parámetros, como: distintos volúmenes, temperaturas, ángulo de desfase, presiones, etcétera, se han obtenido todos los parámetros recopilados en la Tabla 4. Así como gráficas del comportamiento del motor, como: Presión-Volumen, Desfase entre volúmenes, Presión-Ángulo, valores máximos y mínimos de presiones y comparativa de las distintas tipologías de motores.

Gracias a la simulación informática mediante la teoría de Schmidt es posible estudiar las características de los motores Stirling.

Simulando los modelos Alpha, Beta i Gamma, a iguales valores de:

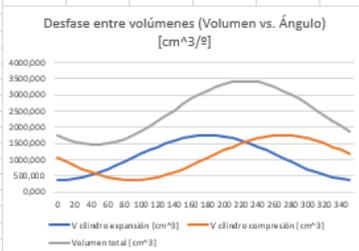
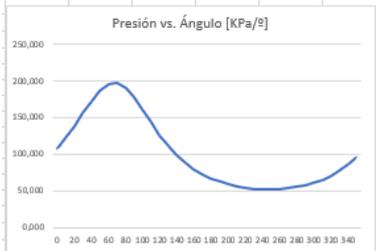
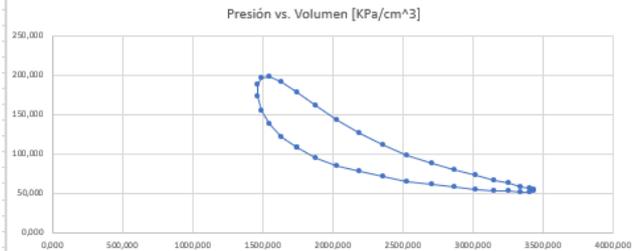
- Volumen barrido por el pistón desplazador (V_{se})
- Volumen barrido por el pistón de trabajo (V_{sc})
- Volumen en punto muerto superior en el cilindro de expansión (V_{de})
- Volumen en punto muerto superior en el cilindro de trabajo (V_{dc})
- Volumen del regenerador (V_r)
- Ángulo de desfase entre pistones (dx)
- Temperatura del cilindro de expansión (T_h)
- Temperatura del cilindro de compresión (T_c)
- Presión media de trabajo (P_m)
- Velocidad del motor (n)

Cálculo de potencia para motor Stirling de tipología Alpha mediante el modelo de simulación Schmidt

Características del motor			
Magnitud	Abreviatura	Unidades	Unidades SI
Volumen de carrera del cilindro desplazador (H)	V _{se}	1400 cm ³	0,0014 m ³
Volumen de carrera del cilindro de trabajo (Co)	V _{so}	1400 cm ³	0,0014 m ³
Volumen del PMS en cilindro desplazador (Hc)	V _{de}	350 cm ³	0,00035 m ³
Volumen del PMS en cilindro de trabajo (Cold)	V _{dc}	350 cm ³	0,00035 m ³
Volumen del regenerador	V _r	350 cm ³	0,00035 m ³
Ángulo de desfase entre pistones	dx	90 °	1,570846 rad
Temperatura en foco caliente	Th	400 °C	673,16 K
Temperatura en foco frío	Tc	20 °C	293,16 K
Presión media de trabajo	P	101,3 kPa	101300 Pa
Velocidad angular del motor	n	1000 rpm	16,66667 rps

Otros datos obtenidos		
Datos	Abreviatura	Unidades
Ratio Y(FMSHot)/Y(Hot)	X _{de}	0,250
Ratio Y(FMSCold)/Y(Cold)	X _{dc}	0,250
Ratio Y(Hot)/Y(Cold)	v	1,000
Ratio temperaturas	t	0,435
Ratio Y(Regenerador)/Y(Hot)	X _r	0,250
Ángulo de desfase de temperaturas	a	66,463 °
N1	S	2,457
N2	B	1,435
Ratio N2/N1	c	0,584
Temperatura regenerador	Tr	210,000 °C

Ángulo del cigüeñal [°]	V cilindro expansión [cm ³]	V cilindro compresión [cm ³]	Volumen total [cm ³]	Presión instantánea [kPa]
0	350,000	1050,000	1750,000	107,219
10	360,635	928,446	1639,081	121,387
20	392,215	810,586	1552,801	137,574
30	443,782	700,000	1493,782	155,079
40	513,769	600,049	1463,818	172,370
50	600,049	513,769	1463,818	186,986
60	700,000	443,782	1493,782	196,016
70	810,586	392,215	1552,801	197,245
80	928,446	360,635	1639,081	190,344
90	1050,000	350,000	1750,000	177,072
100	1171,554	360,635	1882,189	160,276
110	1289,414	392,215	2031,629	142,632
120	1400,000	443,782	2193,782	125,953
130	1499,951	513,769	2363,720	111,157
140	1586,231	600,049	2536,280	98,528
150	1656,218	700,000	2706,218	88,000
160	1707,785	810,586	2868,371	79,351
170	1739,365	928,446	3017,812	72,319
180	1750,000	1050,000	3150,000	66,586
190	1739,365	1171,554	3260,919	62,147
200	1707,785	1289,414	3347,199	58,616
210	1656,218	1400,000	3406,217	55,326
220	1586,231	1499,951	3436,182	53,973
230	1499,951	1586,231	3436,182	52,684
240	1400,000	1656,218	3406,217	52,009
250	1289,414	1707,785	3347,198	51,523
260	1171,554	1739,365	3260,919	52,423
270	1050,000	1750,000	3150,000	53,528
280	928,446	1739,366	3017,811	55,279
290	810,586	1707,785	2868,371	57,743
300	700,000	1656,218	2706,218	61,014
310	600,049	1586,231	2536,280	65,220
320	513,769	1499,952	2363,720	70,523
330	443,782	1400,001	2193,783	77,128
340	392,215	1289,415	2031,630	85,275
350	360,634	1171,554	1882,189	95,225

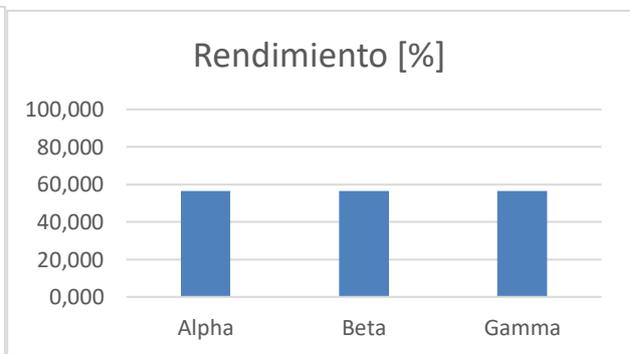
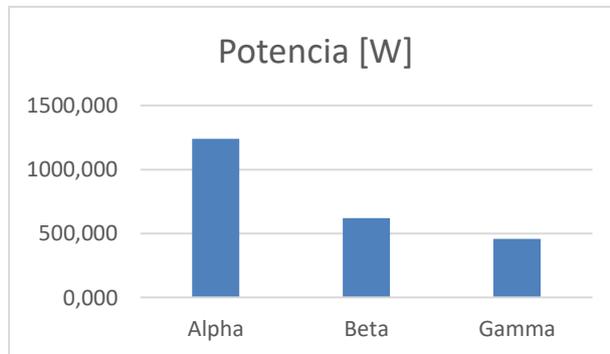


indica valor mínimo
indica valor máximo

Resultados obtenidos mediante la simulación	
Trabajo	
W _e	131,767 J/vuelta
W _o	57,384 J/vuelta
W _i	74,383 J/vuelta
Rendimiento	
η	56,450 %
Potencia	
Le	2196,118 W
Lc	956,405 W
Li	1239,712 W

Ilustración 4-1. Simulación informática de la teoría de Schmidt

Obtenemos los siguientes valores de rendimiento y potencia:



Tablas 5 y 6. Comparativas de potencia y rendimiento a iguales condiciones de trabajo

Se concluye que:

- El rendimiento teórico de las tres tipologías de motor estudiados es el mismo.
- El motor que genera mayor potencia es el Alpha, seguido del Beta y en último lugar el Gamma.
- La tipología de motor más adecuada es la Alpha.

El motor Alpha, no solo es el que genera mayor potencia a igualdad de condiciones, sino que es más sencillo y barato de fabricar que el Beta, ya que al constar de dos cilindros separados no tiene las dificultades constructivas y de estanqueidad debido a que, en el Beta, el pistón de desplazamiento atraviesa al de trabajo.

5. Tendencia de los precios de los combustibles

Para poder estimar gastos de combustibles, así como ahorros y tiempos de amortización, se han tenido que estimar los costes de los carburantes en los próximos años. El método para estimar el precio de los combustibles en un futuro cercano ha sido el siguiente.

Se ha partido de la base de datos Macrotrends, plataforma en línea para la consulta de datos de todo tipo para investigación. De esta fuente, se ha extraído el coste medio del barril de crudo de los últimos 30 años hasta ahora. A partir de ese precio, se ha obtenido el coste del combustible naval IFO 380 e IFO 180, teniendo en cuenta el coste del combustible naval respecto al del barril de crudo.

Con los precios de los últimos 30 años, se ha extrapolado el coste futuro de los combustibles, desde el próximo año hasta el 2049. La estimación que se ha llevado a cabo presenta un incremento exponencial del coste futuro de los combustibles fósiles. Esto es debido a la cada vez mayor demanda de carburantes y al agotamiento de las reservas disponibles de crudo. La tendencia futura de los precios de la combustible puede estimarse en las siguientes ilustraciones.

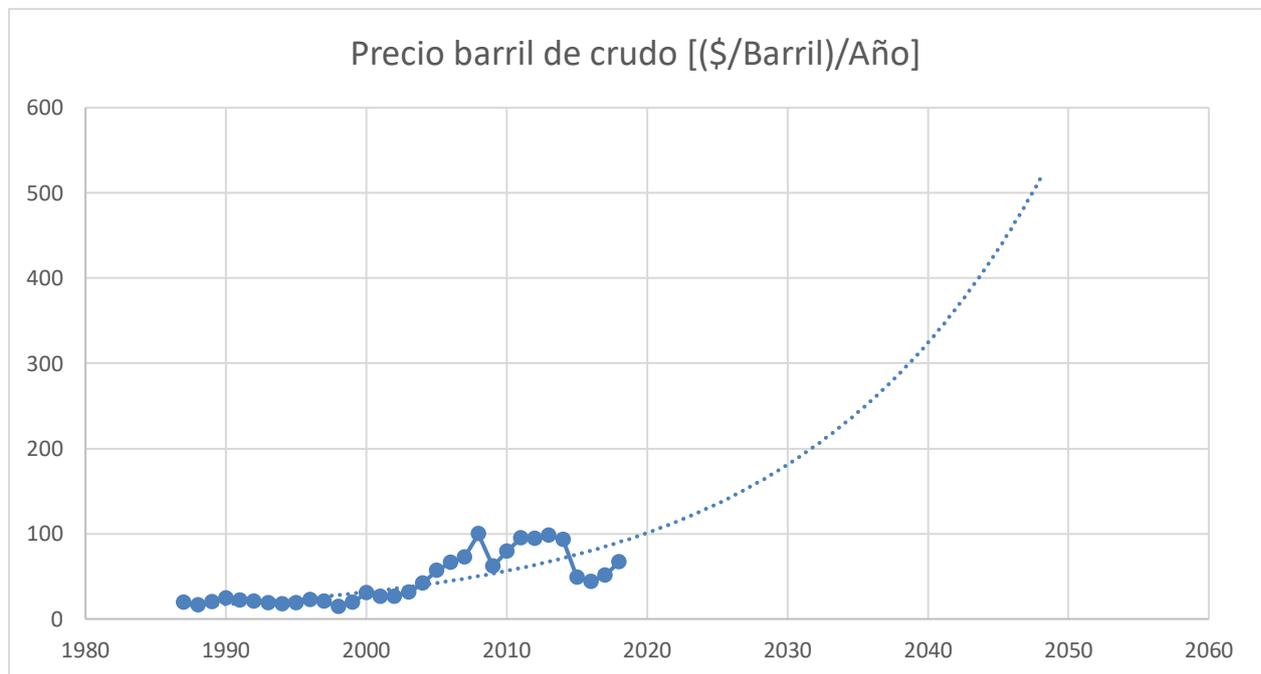


Ilustración 5-1. Tendencia del crudo de aquí a 25 años⁶

⁶ Obtenida de los datos publicados en "Crude Oil Prices - 70 Year Historical Chart. A 01/10/2018. De <https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart,%20>"

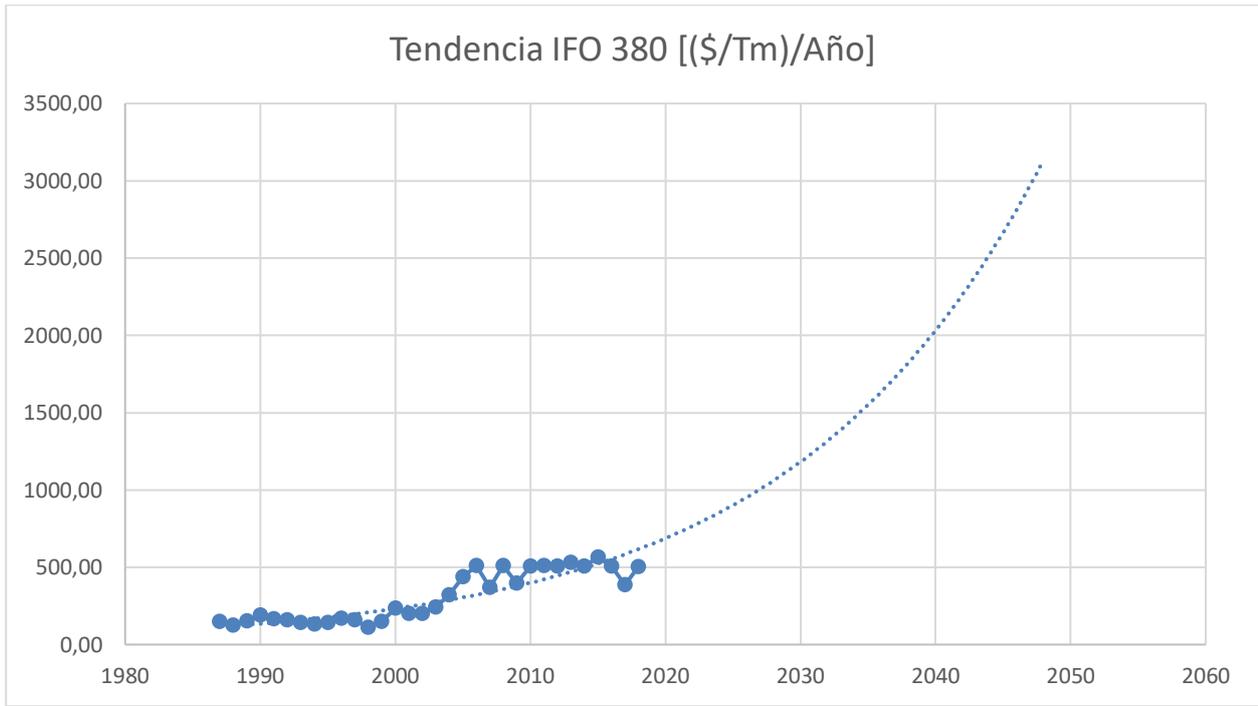


Ilustración 5-2. Tendencia del IFO 380 de aquí a 25 años

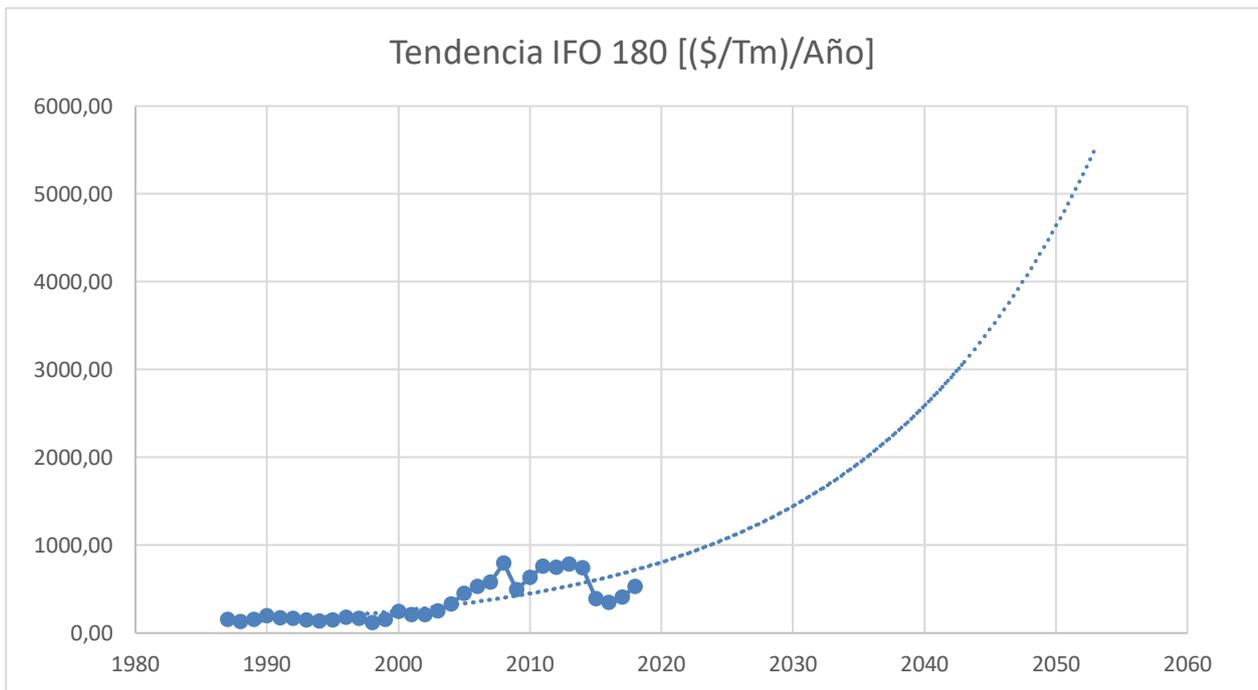


Ilustración 5-3. Tendencia del IFO 180 de aquí a 25 años

En la siguiente tabla podemos ver el precio medio estimado de los combustibles navales IFO 380 e IFO 180, así como la estimación del coste medio del barril de crudo desde el próximo año hasta el 2049.

	Año	Barril de crudo [\$/barril]	IFO 380 [\$/Tm]	IFO 180 [\$/Tm]
Predicción	2049	553,33	3230,00	4463,33
	2047	500,00	2875,00	4000,00
	2045	433,33	2625,00	3500,00
	2043	371,43	2393,75	3000,00
	2041	342,86	2181,25	2743,33
	2039	314,29	1979,17	2492,00
	2037	271,43	1787,50	2246,00
	2035	242,86	1595,83	2000,00
	2033	214,29	1467,50	1780,00
	2031	191,43	1402,50	1560,00
	2029	174,29	1246,67	1375,00
	2027	157,14	1000,00	1225,00
	2025	140,00	910,00	1075,00
	2023	119,03	820,00	921,92
	2021	98,06	726,67	765,75
2019	77,09	592,25	609,58	
Datos reales	2017	50,83	385,04	405,65
	2015	48,72	565,12	388,81
	2013	97,98	532,65	781,93
	2011	94,88	511,98	757,19
	2009	61,95	396,35	494,39
	2007	72,34	369,79	577,31
	2005	56,64	437,77	452,01
	2003	31,08	240,22	248,03
	2001	25,98	200,80	207,33
	1999	19,34	149,48	154,34
	1997	20,61	159,29	164,48
	1995	18,43	142,45	147,08
	1993	18,43	142,45	147,08
	1991	21,54	166,48	171,90
	1989	19,64	151,80	156,74
1987	19,2	148,40	153,23	

Tabla 7. Tendencia de precios de combustibles⁷

La vida media de un buque mercante es de 25 años. Para buques de nueva fabricación, el coste medio del combustible durante toda su vida útil será el siguiente:

Precio medio en los próximos 25 años		
Crudo [\$Barril]	IFO 380 [\$Tm]	IFO 180 [\$Tm]
224,33	1489,69	1800,55

Tabla 8. Coste medio de los combustibles en los próximos 25 años

Los datos obtenidos en este apartado se utilizarán en el siguiente para poder aproximar costes, ahorros y amortizaciones.

⁷ Obtenida de los datos publicados en "Crude Oil Prices - 70 Year Historical Chart. A 01/10/2018. De <https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart,%20>"

6. Motores Stirling en buques

Existen buques de muchos tamaños distintos que desarrollan tareas muy diversas. ¿Podrían los motores Stirling ser utilizados en buques? ¿De qué tareas podrían ocuparse a bordo? Para ello se tienen que plantear que necesidades podrían satisfacer dichos motores. Gracias a su versatilidad, las maquinas Stirling presentan este rango de utilización:

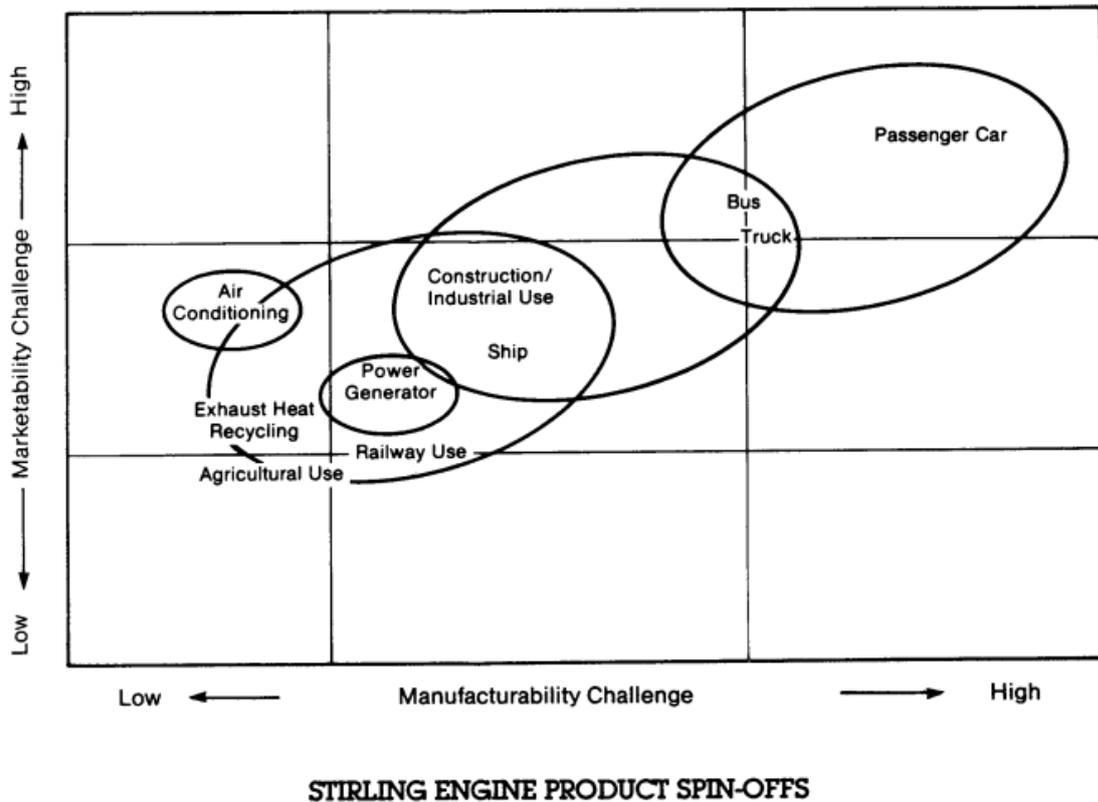


Ilustración 6-1. Gráfica Dificultad implementativa vs. Dificultad constructiva⁸

Se aprecia que el uso en el sector naval se encuentra prácticamente en el centro geométrico de la gráfica, lo cual indica una dificultad intermedia, tanto constructiva como distributiva, para la implementación de estos motores en buques. También se observa que el uso de reaprovechamiento de calor residual es fácilmente aplicable.

⁸ Noel P. Nightingale. 1986. Automotive Stirling Engine, Cleveland, página 4

A bordo de un buque, se necesitan motores principalmente para:

- Propulsar el buque.
- Generar electricidad.

Gracias a la versatilidad de las máquinas Stirling, estas también podrían ocuparse de:

- Aprovechar calor residual.

Se procede a analizar la viabilidad de estas máquinas en estos tres posibles campos de implementación a bordo de buques.

6.1. Propulsión

Actualmente, en la propulsión marina reinan los motores de ciclo Diésel, ya sean motores de 4 tiempos rápidos en embarcaciones de recreo de poco porte, semi-rápidos en el caso de embarcaciones de tamaño medio, o grandes motores Diésel lentos de 2 tiempos, encargados de propulsar buques de grandes esloras.

Pocos años después de la invención del motor Stirling, este se usó en minas y principalmente en granjas. Debido a la victoria del motor de vapor y la posterior invención de los motores de combustión interna y eléctricos, el motor Stirling no llegó a usarse en buques.

Bien entrado el siglo XX, la empresa Philips se interesó por estas clases de máquinas y se construyeron varios modelos comerciales. Para probar los motores Stirling en vehículos, se instalaron en un par de coches y en un autobús público. Las pruebas fueron relativamente satisfactorias, los motores resultaron ser más silenciosos que los gasolina y diésel originales, el autobús donde se instaló un motor Stirling generaba 10 decibelios menos de media que con su motor Diésel original. El mantenimiento se simplificó y vibraba menos, lo cual hacía más confortables los vehículos que los montaban. Como contra, el mayor tiempo para el arranque, así como la mayor demora en el cambio de régimen del motor. Los resultados fueron muy predecibles debido a los conocimientos previos sobre esta clase de máquinas.⁹

Tras las pruebas en vehículos terrestres, un motor Stirling se instaló en un pequeño yate en los Países Bajos. El propulsor fue un Philips monocilíndrico tipo Beta, capaz de entregar 40cv a 1500rpm, usando helio como fluido de trabajo. Este motor contaba con un ingenioso sistema de regulación de la presión media de trabajo, con un compresor y una válvula que permitían introducir y extraer gas helio del motor a una botella. De esta forma se obtenía un mayor control de la potencia entregada por el motor. El barco funcionaba satisfactoriamente, con un bajo consumo de combustible, sin apenas ruido ni vibraciones.

⁹ Johannes Dutch. 2016. Curbside Classic. <http://www.curbsideclassic.com/bus-stop-classic/bus-stop-classic-1970-daf-jonckheere-its-first-power-unit-was-a-philips-stirling-engine/>



Ilustración 6-2. Yate con motor Stirling “Johan de Witt”¹⁰

Desde hace unas décadas, la Armada Real de Suecia cuenta en su flota con submarinos dotados de motores Stirling auxiliares. Estos motores se alimentan quemando una mezcla de oxígeno líquido y diésel. El O₂ se almacena en botellas a alta presión. Con este motor se puede abastecer la red eléctrica del submarino, así como recargar baterías y propulsarse. Gracias a no depender del oxígeno del exterior, estos submarinos pueden navegar durante 14 días a una velocidad de crucero de 5 nudos, sin necesitar subir a la superficie a reabastecerse de aire o sin tener que utilizar el snorkel. Esta autonomía hasta antes de usar los motores Stirling, solo se podía lograr mediante la propulsión nuclear.¹¹

¹⁰ 2013. Under the Hood, Stirling Engine Vehicles (Photo Catalogue). <http://stirlingengineforum.com/viewtopic.php?t=1618>

¹¹ 10/04/2018. Saab Solutions. <https://saab.com/naval/submarines-and-surface-ships/submarines/submarines/>

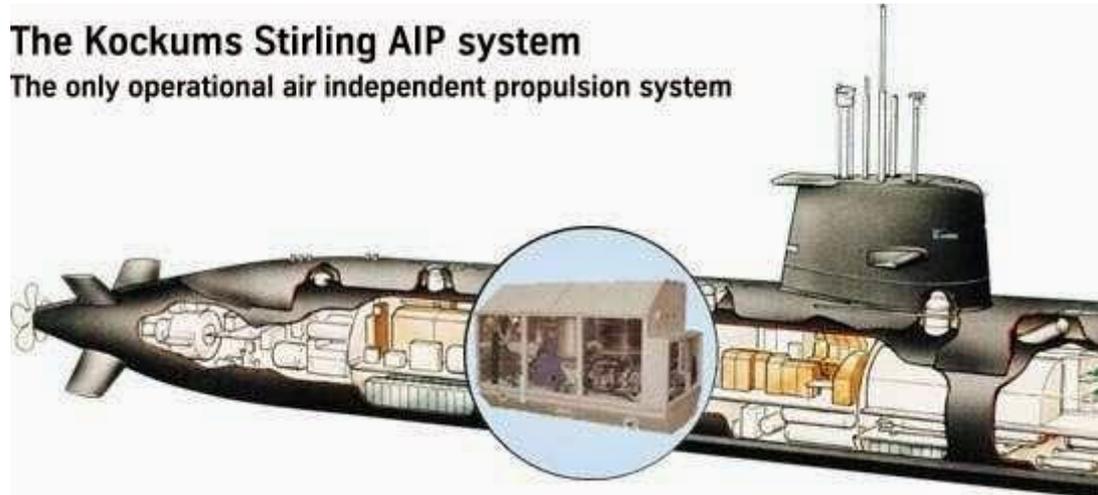


Ilustración 6-3. Submarino clase Gotland, dotado con motor Stirling¹²

Hoy en día no vemos buques propulsados por maquinas Stirling, esto se debe principalmente a:

- **Poca investigación y producción de motores Stirling de grandes potencias:**

Aunque desde la segunda mitad del siglo pasado el motor Stirling ha renacido, el uso de éste se centra en la generación de energía limpia y en la refrigeración-criogénesis. No se está investigando en máquinas Stirling de gran potencia, sino en motores compactos de poco porte.

- **Coste mucho mayor a motores de ciclo Diésel:**

Los motores Stirling no se fabrican a gran escala, tan solo se producen bajo demanda en pocas unidades. Esto hace que la artesanía del proceso y la baja distribución encarezcan la adquisición de estos motores. Los materiales de alta resistencia térmica y los obturadores de gas son elementos realmente caros. Si se fabricasen en serie y se extendieran más, su precio se reduciría. Hoy en día, producir maquinas Stirling en serie sería el doble de caro que el de uno Diésel de igual potencia, tan solo teniendo en cuenta los costes en materiales.

¹² Submarine Matters. 2014. Air Independent Propulsion. <http://gentle seas.blogspot.com/2014/08/air-independent-propulsion-aip.html>

En el caso de que la propulsión por medio de máquinas Stirling fuese posible, esta presentaría las siguientes ventajas respecto a los motores Diésel usados hoy en día.

- **Mayor rendimiento termodinámico y par motor:**

Los motores Stirling son los que más se acercan al rendimiento de Carnot, mientras que los motores navales de mayor rendimiento, los grandes Diésel 2T con turbocompresor, no logran sobrepasar rendimientos mayores al 52%. Los motores Stirling presentan un mayor torque que los de combustión interna, incluso a muy bajas revoluciones.

- **Menos vibraciones y ruido:**

Las máquinas Stirling son más silenciosas de operar que los motores de combustión interna, esto haría que en sala de máquinas el nivel de ruido fuera menor. Al contar con menos piezas móviles, los motores Stirling vibran mucho menos que los motores de combustión interna alternativos usados en la actualidad. Esto haría que los polines pudiesen simplificarse y soportaran menos esfuerzos, así como se reduciría la fatiga y el afloje de tuercas y tornillos.

- **Mayor polivalencia de combustibles:**

Al tratarse de máquinas de combustión externa, estas pueden obtener el calor de cualquier fuente de energía: fuel-oleo, diésel, gasolina, gas, madera, carbón, nuclear, etcétera. Factor ampliamente beneficioso a la hora de navegar por zonas ECAs y demás lugares con controles y restricciones de gases de escape y requisitos de combustibles.

6.1.1. Dimensionamiento propulsivo

A continuación, se procede a analizar el uso de máquinas Stirling como motores propulsores para embarcaciones. Para ello se utilizará la teoría de Schmidt programada en una hoja de cálculo Excel.

La herramienta Solver, del programa informático Excel, permite optimizar los resultados de ecuaciones y cálculos complejos. Para ello se introducen las variables con las que el programa trabajará, se le imponen restricciones, como podrían ser limitaciones de volúmenes, presión o temperatura. A continuación, se indica el objetivo deseado, por ejemplo, maximizar el rendimiento, o conseguir cierta potencia con menor salto térmico, etc. Mediante iteraciones cíclicas, el programa encuentra la mejor combinación de parámetros para conseguir el objetivo.

Con el uso de Solver, se optimizarán las características del motor Stirling simulado para conseguir un mayor rendimiento y potencia.

6.1.1.1. Buque de tamaño medio

Se procede a comprobar las dimensiones para utilizar un motor Stirling tipo Alpha para propulsar un buque de tamaño medio.

Para la simulación se usará el portacontenedores de cabotaje OPDR Tánger como ejemplo. Estas son sus especificaciones técnicas:

Peso muerto: 8168T

Capacidad de carga: 698 TEUs

Eslora: 129,59m

Manga: 20,6m

Calado medio: 7,4m

Velocidad de crucero: 16,5kn

Motor: Caterpillar 7M 43C

Potencia: 7000KW¹³



Ilustración 6-4. Buque OPDR Tánger¹⁴

¹³ 2018. Port of Hamburg. <https://www.hafen-hamburg.de/en/vessel/opdr-tanger-imo-9389306---28916>

¹⁴ 2018. Marine Traffic. <https://www.marinetraffic.com/ais/details/ships/9389306>

Para ver las características del motor Alpha, se introduce el en Solver de Excel la potencia deseada, así como limitaciones de temperaturas, ángulo de desfase entre pistones, presión media de trabajo, y velocidad de giro del motor.

Características del motor				
Magnitud	Abreviatura		Unidades	Unidades SI
Volumen de carrera del cilindro desplazador (Hot)	Vse	1583610,2	cm ³	1,5836102 m ³
Volumen de carrera del cilindro de trabajo (Cold)	Vsc	1583610,2	cm ³	1,5836102 m ³
Volumen del PMS en cilindro desplazador (Hot)	Vde	395902,55	cm ³	0,39590255 m ³
Volumen del PMS en cilindro de trabajo (Cold)	Vdc	395902,55	cm ³	0,39590255 m ³
Volumen del regenerador	Vr	395902,55	cm ³	0,39590255 m ³
Ángulo de desfase entre pistones	dx	90	º	1,570846 rad
Temperatura en foco caliente	Th	650	ºC	923,16 K
Temperatura en foco frío	Tc	25	ºC	298,16 K
Presión media de trabajo	P	800	kPa	800000 Pa
Velocidad angular del motor	n	500	rpm	8,33333333 rps

Otros datos obtenidos			
Datos	Abreviatura		Unidades
Ratio V(PMSHot)/V(Hot)	Xde	0,250	
Ratio V(PMSCold)/V(Cold)	Xdc	0,250	
Ratio V(Hot)/V(Cold)	v	1,000	
Ratio temperaturas	t	0,323	
Ratio V(Regenerador)/V(Hot)	Xr	0,250	
Ángulo de desfase de temperaturas	a	72,103	º
N1	S	2,229	
N2	B	1,323	
Ratio N2/N1	c	0,594	
Temperatura regenerador	Tr	337,500	ºC

Ilustración 6-5. Simulación informática, buque tamaño medio

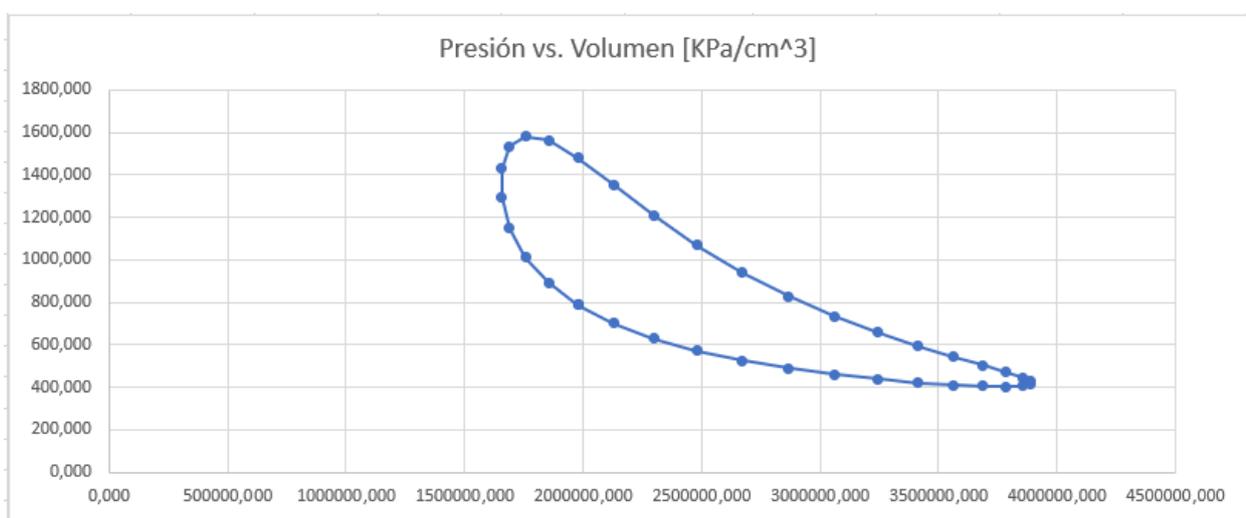


Ilustración 6-6. Simulación informática, gráfica P-V, buque tamaño medio

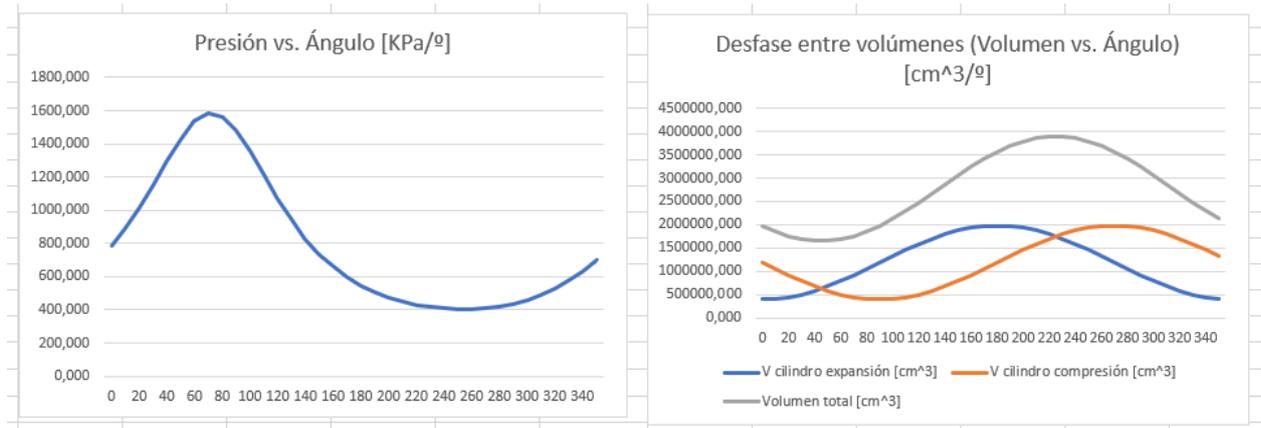


Ilustración 6-7. Simulación informática. Diagrama P-Ángulo y Desfases entre volúmenes, buque tamaño medio

Resultados obtenidos mediante la simulación		
Trabajo		
We	1245822,988	J/vuelta
Wc	402372,917	J/vuelta
Wi	843450,071	J/vuelta
Rendimiento		
e	67,702	%
Potencia		
Le	10381858,233	W
Lc	3353107,642	W
Li	7028750,591	W

Ilustración 6-8. Simulación informática. Rendimiento y potencia del motor, buque tamaño medio

Los resultados demuestran que, para igual potencia máxima y número de revoluciones, y usando un motor Stirling que opera a 8 atmósferas de presión, este ha de tener una cilindrada total de 3167,22 litros. Esto es más de 6 veces la cilindrada del motor original. Resulta totalmente inviable usar estos motores para propulsar buques mercantes, las salas de máquinas deberían ser mucho mayores para ubicar los motores en su interior. A esta desventaja, se suma el coste de producción de motores Stirling, que es más del doble del precio de fabricación de un motor Diésel de igual potencia.

Motor original	
Parámetro	Uds
Fabricante	Caterpillar
Modelo	7M43C
Nº de cilindros	7
∅	430 mm
Carrera	610 mm
n	500 rpm
Potencia	7000 KW
Cilindrada total	620,09 l

Motor Stirling Alpha	
Parámetro	Uds
Nº de cilindros	8
∅	708 mm
Carrera	1005 mm
n	500 rpm
Potencia	7000 KW
Volumen cilindros	3167,22 l
Cilindrada total	3886,87 l

Cilindrada Stirling/Diésel	626,82 %
----------------------------	----------

Tablas 9 y 10. Comparativa de características motor original y motor Stirling

6.1.1.2. Embarcación pequeña

Visto que resulta totalmente inviable propulsar un buque de tamaño medio, se procede a comprobar su utilidad para la propulsión de embarcaciones menores. Donde la potencia requerida es mucho menor. Para el siguiente ejemplo se usará el velero Beneteau Oceanis 31:

Estas son sus características principales:

Desplazamiento: 4,85T

Eslora: 9,66m

Manga: 3,39m

Calado: 1,8m

Motor: Yanmar 3YM20

Potencia: 15,4KW¹⁵

¹⁵ 2018. Beneteau. <http://www.beneteau.com/es/oceanis/oceanis-31>



Ilustración 6-9. Velero Beneteau Oceanis 31¹⁶

De igual modo que en el caso anterior, se introduce en la hoja de cálculo programada con la teoría de Schmidt los valores deseados, y se programa el Solver a buscar el mejor resultado, con limitaciones de $n=1000$ debido al pequeño tamaño del motor, y a T_h de 400°C por seguridad, al tratarse de una embarcación menor:

¹⁶ 2018. Nautivala Barcelona. <http://www.beneteaubcn.com/barcos-en-stock/en-venta-oceanis-31-1/>

Características del motor				
Magnitud	Abreviatura		Unidades	Unidades SI
Volumen de carrera del cilindro desplazador (Hot)	Vse	2211,7369	cm ³	0,00221174 m ³
Volumen de carrera del cilindro de trabajo (Cold)	Vsc	2211,7369	cm ³	0,00221174 m ³
Volumen del PMS en cilindro desplazador (Hot)	Vde	552,934225	cm ³	0,00055293 m ³
Volumen del PMS en cilindro de trabajo (Cold)	Vdc	552,934225	cm ³	0,00055293 m ³
Volumen del regenerador	Vr	552,934225	cm ³	0,00055293 m ³
Ángulo de desfase entre pistones	dx	95,176925	º	1,66120324 rad
Temperatura en foco caliente	Th	400	ºC	673,16 K
Temperatura en foco frío	Tc	25	ºC	298,16 K
Presión media de trabajo	P	810,4	kPa	810400 Pa
Velocidad angular del motor	n	1000	rpm	16,6666667 rps

Otros datos obtenidos			
Datos	Abreviatura		Unidades
Ratio V(PMSHot)/V(Hot)	Xde	0,250	
Ratio V(PMSCold)/V(Cold)	Xdc	0,250	
Ratio V(Hot)/V(Cold)	v	1,000	
Ratio temperaturas	t	0,443	
Ratio V(Regenerador)/V(Hot)	Xr	0,250	
Ángulo de desfase de temperaturas	a	70,502	º
N1	S	2,471	
N2	B	1,411	
Ratio N2/N1	c	0,571	
Temperatura regenerador	Tr	212,500	ºC

Ilustración 6-10. Simulación informática, embarcación pequeña

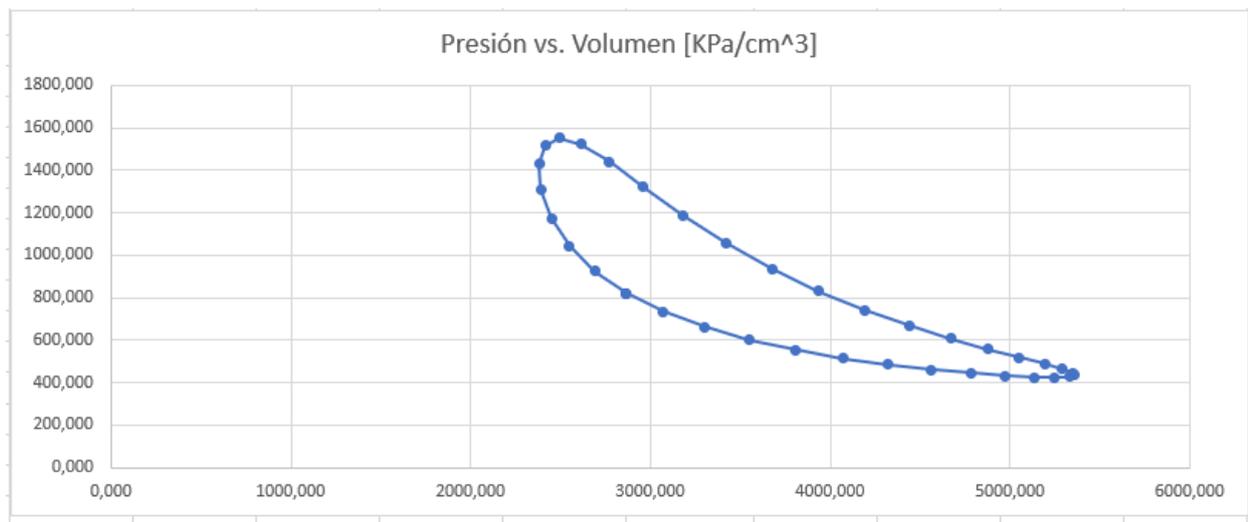


Ilustración 6-11. Simulación informática. Gráfica P-V, embarcación pequeña

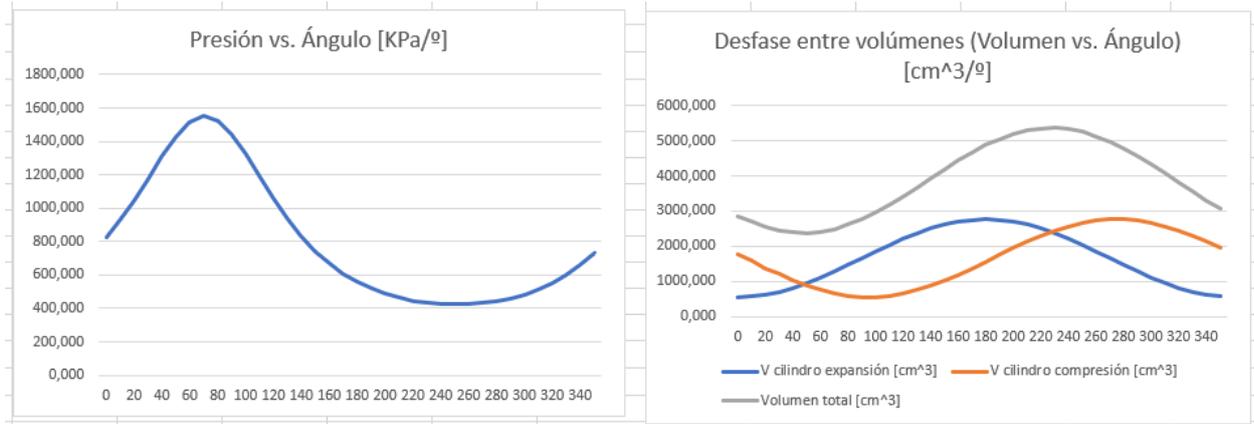


Ilustración 6-12. Simulación informática. Diagrama P-Ángulo y Desfases entre volúmenes, embarcación pequeña

Resultados obtenidos mediante la simulación		
Trabajo		
We	1664,698	J/vuelta
Wc	737,338	J/vuelta
Wi	927,360	J/vuelta
Rendimiento		
e	55,707	%
Potencia		
Le	27744,963	W
Lc	12288,963	W
Li	15456,000	W

Ilustración 6-13. Simulación informática. Rendimiento y potencia del motor, embarcación pequeña

Motor original		
Parámetro		Uds
Fabricante	Yanmar	
Modelo	3YM20	
Nº de cilindros		3
∅		70 mm
Carrera		74 mm
n		3600 rpm
Potencia		15,46 KW
Cilindrada total		0,85 l

Motor Stirling Alpha		
Parámetro		Uds
Nº de cilindros		4
∅		110 mm
Carrera		116 mm
n		3600 rpm
Potencia		15,46 KW
Volumen cilindros		4,42 l
Cilindrada total		5,36 l

Cilindrada Stirling/Diésel	627,37 %
----------------------------	----------

Tablas 11 y 12. Comparativa de características motor original y motor Stirling

Los resultados son similares a los del caso anterior. El motor Stirling homologado al original del velero requiere una cilindrada más de 5 veces mayor al procedente de fábrica. Lo cual requeriría ampliar el compartimento del motor de forma significativa, teniendo que prescindir de un camarote para poder ubicar el voluminoso motor Stirling. Resulta inviable utilizarlo como máquina propulsiva.

6.2. Generación eléctrica

Todo buque necesita electricidad para poder alimentar infinidad de sistemas. Hoy en día, dicha electricidad se puede obtener a bordo mediante baterías (inviable en embarcaciones grandes) o mediante el uso de motores auxiliares y/o generadores de cola. Estas últimas formas de obtener electricidad a bordo son las empleadas en todo tipo de buques. El generador de cola no suele ser el único generador eléctrico de buques que disponen de él, suelen ir acompañados de, al menos, dos motores auxiliares para la generación eléctrica. Los motores auxiliares de grandes buques suelen ser motores alternativos de 4 tiempos, semi-rápidos, alimentados independientemente de los motores principales. Cuentan con sus propios sistemas de lubricación, arranque y refrigeración, que acoplados a alternadores que se encargan de transformar la energía mecánica que reciben del eje del motor, en energía eléctrica que se distribuye por el barco.

Analicemos la viabilidad de implementar motores Stirling como motores auxiliares:

6.2.1. Dimensionamiento para generación eléctrica

Esta simulación pretende estudiar la viabilidad de utilizar motores Stirling como motores auxiliares para su uso en buques. Para ello, se tomará como ejemplo el motor Caterpillar 6M20C. En la siguiente tabla se pueden ver sus características:

TECHNICAL DATA

Type	Engine rating		Output range		Frequency	Speed	Mean eff. pressure	Mean piston speed	Spec fuel consumption	
	kW	kWe	kVA	Hz	rpm	bar	m/s	100%	85%	
								g/kWh	g/kWh	
6 M 20 C	1020	979	1224	60	900	24.1	9.0	189	188	
	1080	1036	1296	60	900	25.5	9.0	191	189	
	1140	1094	1368	50	1000	24.2	10.0	190	189	
	1200	1151	1440	50	1000	25.5	10.0	192	190	
8 M 20 C	1360	1306	1632	60	900	24.1	9.0	189	188	
	1440	1381	1728	60	900	25.5	9.0	191	189	
	1520	1459	1824	50	1000	24.2	10.0	190	189	
	1600	1534	1920	50	1000	25.5	10.0	192	190	
9 M 20 C	1530	1468	1836	60	900	24.1	9.0	189	188	
	1620	1553	1944	60	900	25.5	9.0	191	189	
	1710	1641	2052	50	1000	24.2	10.0	190	189	
	1800	1726	2160	50	1000	25.5	10.0	192	190	

Stroke: 300 mm Specific lubricating oil consumption 0.6 g/kWh, ± 0.3 g/kWh
 Bore: 200 mm LCV = 42700 kJ/kg, without engine-driven pumps, tolerance 5%
 Generator efficiency: 0.96, cos φ : 0.8

Tabla 13. Regímenes y características de los motores Caterpillar CAT serie 20C¹⁷

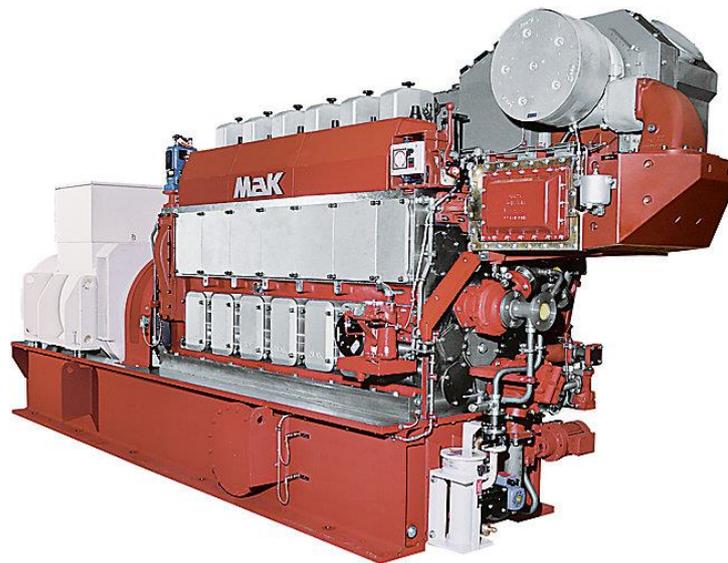


Ilustración 6-14. Motor Auxiliar Caterpillar 6M20C¹⁸

¹⁷ Caterpillar. 2016. Engine Selection Guide.

¹⁸ 2007. Caterpillar Motoren GmbH & Co. KG.
<http://www.bmgs.com.tr/doc/GucSistemleri/Marin/Mak/M20CGenerator.pdf>

En la simulación, se ensaya un motor Stirling tipo Alpha con igual cilindrada y velocidad de giro que el motor Caterpillar 6M20C.

Cálculo de potencia para motor Stirling de tipología Alpha mediante el modelo de simulación Schmidt

Características del motor				
Magnitud	Abreviatura		Unidades	Unidades SI
Volumen de carrera del cilindro desplazador (Hot)	Vse	56400	cm ³	0,0564 m ³
Volumen de carrera del cilindro de trabajo (Cold)	Vsc	56400	cm ³	0,0564 m ³
Volumen del PMS en cilindro desplazador (Hot)	Vde	14100	cm ³	0,0141 m ³
Volumen del PMS en cilindro de trabajo (Cold)	Vdc	14100	cm ³	0,0141 m ³
Volumen del regenerador	Vr	14100	cm ³	0,0141 m ³
Ángulo de desfase entre pistones	dx	88,078638	º	1,53731085 rad
Temperatura en foco caliente	Th	600	ºC	873,16 K
Temperatura en foco frío	Tc	30	ºC	303,16 K
Presión media de trabajo	P	810,4	kPa	810400 Pa
Velocidad angular del motor	n	1000	rpm	16,6666667 rps

Otros datos obtenidos		
Datos	Abreviatura	Unidades
Ratio V(PMShot)/V(Hot)	Xde	0,250
Ratio V(PMScold)/V(Cold)	Xdc	0,250
Ratio V(Hot)/V(Cold)	v	1,000
Ratio temperaturas	t	0,347
Ratio V(Regenerador)/V(Hot)	Xr	0,250
Ángulo de desfase de temperaturas	a	69,149 º
N1	S	2,279
N2	B	1,360
Ratio N2/N1	c	0,597
Temperatura regenerador	Tr	315,000 ºC

Ilustración 6-15. Simulación informática, motor auxiliar

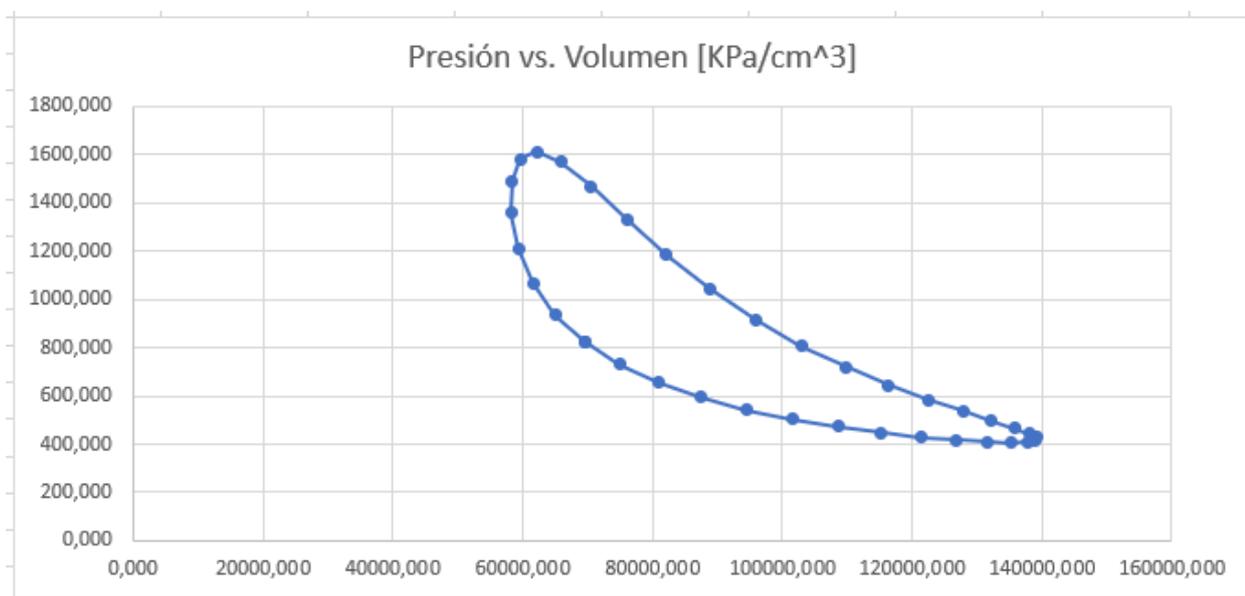


Ilustración 6-16. Simulación informática. Gráfica P-V, motor auxiliar

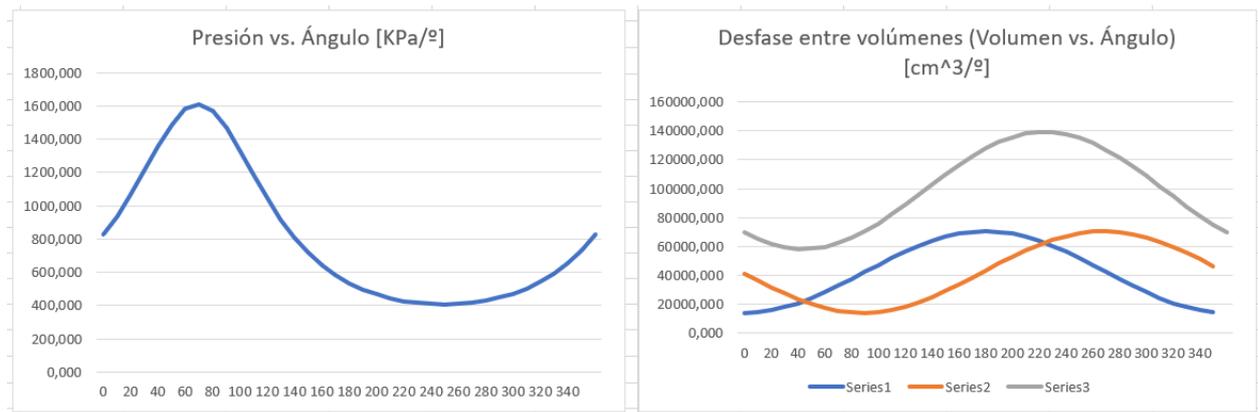


Ilustración 6-17. Simulación informática. Diagrama P-Ángulo y Desfases entre volúmenes, motor auxiliar

Resultados obtenidos mediante la simulación		
Trabajo		
We	44421,968	J/vuelta
Wc	15423,249	J/vuelta
Wi	28998,719	J/vuelta
Rendimiento		
e	65,280	%
Potencia		
Le	740366,138	W
Lc	257054,146	W
Li	483311,991	W

Ilustración 6-18. Simulación informática. Rendimiento y potencia del motor, motor auxiliar

Estos son los resultados obtenidos:

Motor original	
Parámetro	Uds
Fabricante	Caterpillar
Modelo	6M20C
Nº de cilindros	6
∅	200 mm
Carrera	300 mm
n	1000 rpm
Potencia	1020 kW
Cilindrada total	56,55 l

Motor Stirling Alpha	
Parámetro	Uds
Nº de cilindros	4
∅	229 mm
Carrera	343 mm
n	1000 rpm
Potencia	483,312 kW
Cilindrada total	56,55 l

Potencia Stirling/Diésel	47,38 %
--------------------------	---------

Tablas 14 y 15. Resultados de la comparativa MMAA Diésel vs. Stirling

Los resultados indican que un motor Stirling, trabajado en dichas condiciones, y presurizado a 8 atmósferas para conseguir mayor potencia, solo es capaz de generar 483 kW, que es el 47,3% de la potencia conseguida por el motor de ciclo Diésel. Así que, los motores Stirling no son viables como motores auxiliares para su uso en buques, ya que se pierde gran parte de la potencia obtenida con motores de ciclo Diésel, lo cual obligaría a reducir el consumo eléctrico, o aumentar el tamaño o unidades de motores Stirling, ambas soluciones son inviables desde el punto de vista práctico y económico.

6.3. Aprovechamiento de calor residual

En el momento que los motores de combustión empezaron a propulsar barcos, el calor de los gases de escape se aprovechó de diversas formas. Inicialmente, se pasaban las chimeneas por las superestructuras para calentarlas. Posteriormente se aprovechaba el calor residual para calentar agua dulce. Más tarde llegaron las calderetas de gases de exhaustación, para generar electricidad a partir de vapor generado por la evaporación de agua calentada por los gases de escape.

Desde hace décadas, este es el campo de investigación y desarrollo donde más esfuerzos y estudios se han invertido para los motores Stirling. Esto se debe principalmente a, como se ha estudiado en los apartados anteriores, estas máquinas no son viables hoy en día para usarlas como motores principales en vehículos autopropulsados. Gracias a su alto coste de producción, gran volumen del motor, mayor tiempo para el arranque y la demora para la variación de velocidad, no pueden equipararse en nuestros días con los motores de combustión interna de los que disponemos. Estos inconvenientes no son un problema para el aprovechamiento de calor residual. Cualquier energía que se pueda reaprovechar será bien recibida, por poca que sea.

Aprovechando calor residual se puede generar movimiento rotacional en el eje del motor Stirling. Este movimiento se puede utilizar para impulsar una bomba o generar electricidad, entre otros usos. A bordo de un buque se encuentran principalmente dos focos de calor residual donde podemos plantear la instalación de máquinas Stirling: los gases de escape y la refrigeración de los motores.

6.3.1. Gases de escape

Las chimeneas de los buques son un interesante punto de estudio de la viabilidad de los motores Stirling para aprovechar calor residual. Los escapes de buques son grandes superficies a una gran temperatura. De ahí se puede aprovechar el calor desperdiciado de los gases de escape para calentar los focos cálidos de máquinas Stirling para que generen movimiento rotacional y poder convertirlo en electricidad. Esa electricidad producida sería 100% limpia, ya que provendría de un calor que sería desperdiciado hacia la atmósfera.

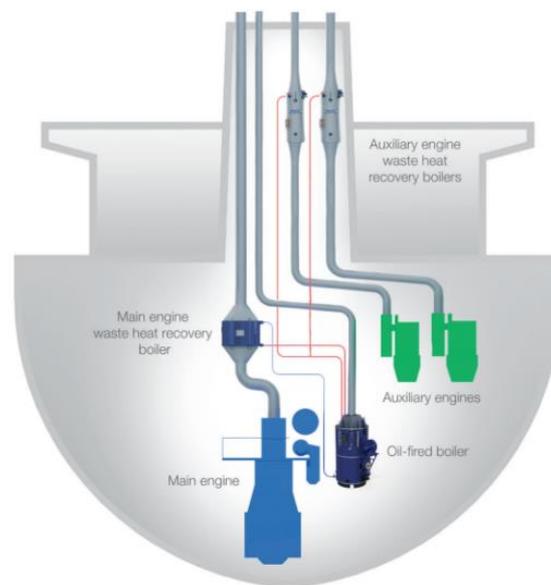


Ilustración 6-19. Sistema de gases de escape de un buque¹⁹

Se procede al dimensionamiento de la potencia generada por motores Stirling para producir energía limpia a partir del calor residual de chimeneas de buques.

Para esta simulación se usan pequeños motores Stirling, unidades compactas e intercambiables, similares a las que se encuentran en campos solares de disco Stirling.

¹⁹ 2018. Global maritime energy efficiency partnerships. <https://glomeep.imo.org/technology/exhaust-gas-boilers-on-auxiliary-engines/>

La ventaja de usar varios motores pequeños es:

- Capacidad de producirse en serie.
- Abaratamiento de la fabricación.
- Rápida sustitución en caso de avería.
- Disponibilidad de piezas de respeto.
- Mayor facilidad para transporte y montaje.

Y las desventajas:

- Menor potencia unitaria.
- Necesidad de crear una estructura más compleja que para un solo motor grande.
- Menor superficie de intercambio térmico.

6.3.2. Dimensionamiento de regeneración en chimeneas

Para la simulación, se acoplan los motores Stirling a la parte final de la chimenea, tras haber pasado los gases de escape por la caldereta de gases de exhaustación y por el scrubber, contando los gases con una temperatura relativamente baja, 400°C, la temperatura en los focos fríos se estima de 45°C debido a su proximidad a la chimenea y a la limitada ventilación de la zona. Los motores se instalarán en una chimenea, de diámetro 0,95m y altura aprovechable de 3m.

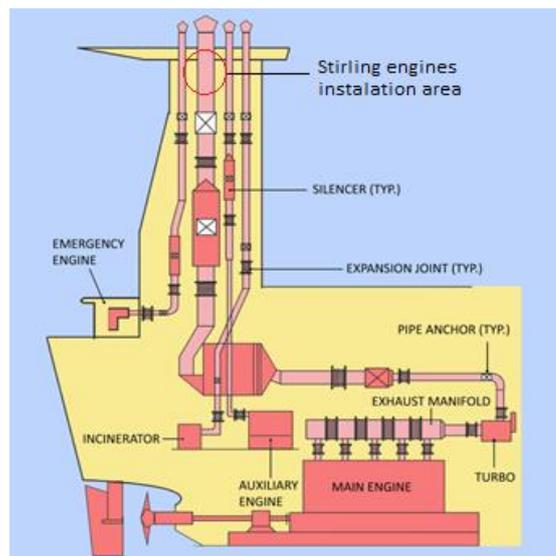


Ilustración 6-20. Área de instalación de los motores Stirling²⁰

²⁰ Anish Wankhede. 2017. Marine in Sight. <https://www.marineinsight.com/main-engine/exhaust-gas-system-of-main-engine-on-ship/>

6.3.2.1. Buque de nueva construcción

En esta simulación, se pretende comprobar la viabilidad de la instalación de una planta regeneradora mediante motores Stirling. Esta se emula en un buque de nueva construcción de tamaño medio, con una vida útil esperada de 25 años.

Condiciones de la simulación:

Magnitud		Unidades
Nº chimeneas	1	
Diámetro	0,95	m
Altura aprovechable	3	m
Área chimeneas	8,954	m ²
Área aprovechable	7	m ²
Tª gases de escape	400	ºC

Motores Stirling Alpha pequeños		Unidades
Unidades	7	
Volumen conjunto motor	1	m ³
Diámetro	0,265	m
Carrera	0,265	m
Cilindrada total	0,029	m ³
Potencia unitaria	4755,187	W
Potencia mecánica	33286,307	W
Potencia eléctrica	29957,67674	W

Tabla 16. Datos de la instalación de motores Stirling y de sus características

Comportamiento de los motores Stirling:

Características del motor				
Magnitud	Abreviatura		Unidades	Unidades SI
Volumen de carrera del cilindro desplazador (Hot)	Vse	14544,4074	cm ³	0,01454441 m ³
Volumen de carrera del cilindro de trabajo (Cold)	Vsc	14544,4074	cm ³	0,01454441 m ³
Volumen del PMS en cilindro desplazador (Hot)	Vde	3636,10185	cm ³	0,0036361 m ³
Volumen del PMS en cilindro de trabajo (Cold)	Vdc	3636,10185	cm ³	0,0036361 m ³
Volumen del regenerador	Vr	3636,10185	cm ³	0,0036361 m ³
Ángulo de desfase entre pistones	dx	97,478	°	1,70136241 rad
Temperatura en foco caliente	Th	400	°C	673,16 K
Temperatura en foco frío	Tc	45	°C	318,16 K
Presión media de trabajo	P	101,3	kPa	101300 Pa
Velocidad angular del motor	n	400	rpm	6,66666667 rps

Otros datos obtenidos			
Datos	Abreviatura		Unidades
Ratio V(PMSHot)/V(Hot)	Xde	0,250	
Ratio V(PMSCold)/V(Cold)	Xdc	0,250	
Ratio V(Hot)/V(Cold)	v	1,000	
Ratio temperaturas	t	0,473	
Ratio V(Regenerador)/V(Hot)	Xr	0,250	
Ángulo de desfase de temperaturas	a	70,946	°
N1	S	2,530	
N2	B	1,428	
Ratio N2/N1	c	0,564	
Temperatura regenerador	Tr	222,500	°C

Ilustración 6-21. Simulación informática, instalación en chimenea

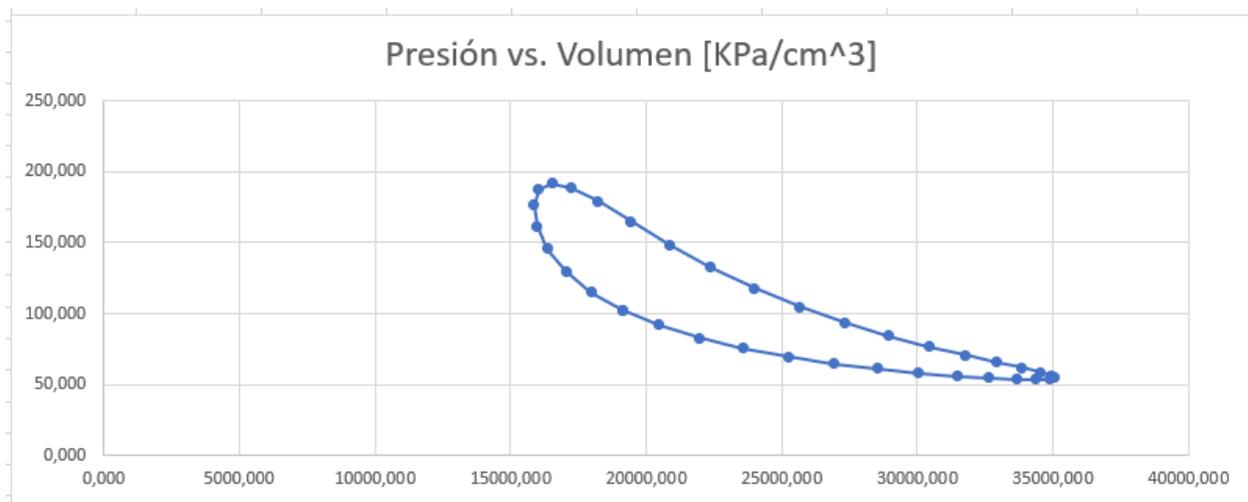


Ilustración 6-22. Simulación informática. Gráfica P-V, instalación en chimenea

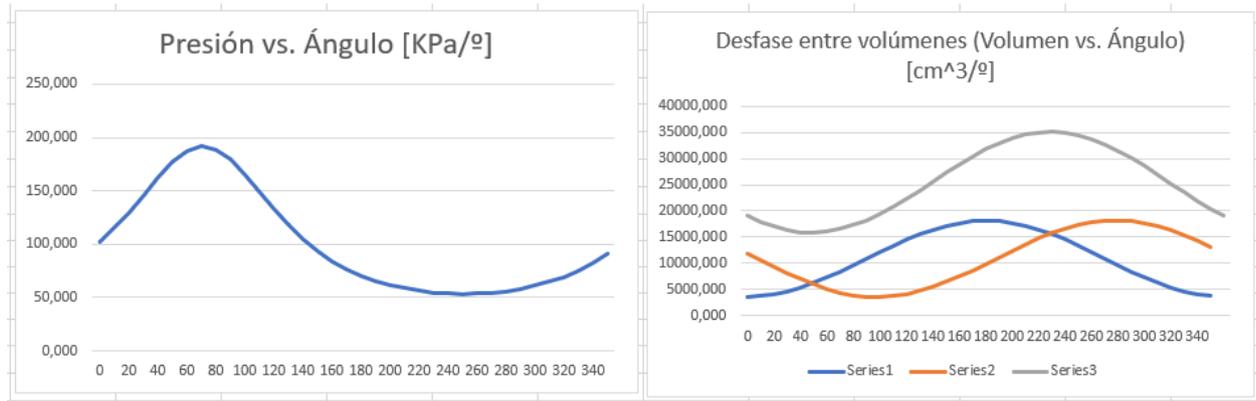


Ilustración 6-23. Simulación informática. Diagrama P-Ángulo y Desfases entre volúmenes, instalación en chimenea

Resultados obtenidos mediante la simulación		
Trabajo		
We	1352,536	J/vuelta
Wc	639,258	J/vuelta
Wi	713,278	J/vuelta
Rendimiento		
e	52,736	%
Potencia		
Le	9016,906	W
Lc	4261,719	W
Li	4755,187	W

Ilustración 6-24. Simulación informática. Rendimiento y potencia del motor, instalación en chimenea

Resultados obtenidos:

Se observa que, cada motor genera una potencia de 4,76 KW. En conjunto, la instalación genera 33,29 KW. Considerando un rendimiento del 90% al transformar la energía mecánica en eléctrica, la planta de recuperación Stirling produce 29,96KW de potencia eléctrica. La cual puede satisfacer un porcentaje de la potencia eléctrica requerida, aliviando el trabajo de los MMAA del buque.

Ahorro en navegación	
Buque con MMAA Cat 6 M 20 C, 1 unidad	
P. eléctrica generada	979 Kw
Cee	189 g/kW*h
Porcentaje tiempo en uso	0,85
Vida útil del buque	25 años
Combustible necesario	
en 25 años	3,589E+04 Tm
Precio IFO 380 *	1489,69 \$/Tm
Coste total de combustible	5,346E+07 \$
Energía eléctrica ahorrada	2,60 %
Dinero ahorrado	1390482 \$ en 25 años
Ahorro en maniobra, mayor consumo eléctrico	
Buque con MMAA Cat 6 M 20 C, 2 unidades	
P. eléctrica generada	1958 Kw
Cee	189 g/kW*h
Porcentaje tiempo en uso	0,85
Vida útil del buque	25 años
Combustible necesario	
en 25 años	7,177E+04 Tm
Precio IFO 380 *	1489,69 \$/Tm
Coste total de combustible	1,069E+08 \$
Energía eléctrica ahorrada	1,30 %
Dinero ahorrado	1390482 \$ en 25 años

Ilustración 6-25. Simulación informática. Porcentajes y Ahorros, instalación en chimenea

Tras calcular la potencia generada por motores Stirling acoplados en los escapes de grandes mercantes se llega a la conclusión que pueden generar un pequeño porcentaje de la energía eléctrica que consume el buque. Para ello se ha comparado la potencia que generan dos motores Caterpillar Cat 6M20C. Las situaciones comparadas han sido:

- 1) **Plena carga:** Donde el consumo eléctrico es la totalidad de los que los MMAA son capaces de generar, 1958KW. En esta situación el grupo de motores Stirling acoplado a la chimenea del buque ha sido capaz de generar el 1,3% del consumo eléctrico del buque.
- 2) **Condición de navegación:** En este momento, el buque requiere la mitad de la potencia eléctrica que los MMAA son capaces de generar, en esta situación, las maquinas Stirling satisfacen el 2,6% de potencia eléctrica requerida.

Teniendo en cuenta que los buques mercantes pasan la mayor parte del tiempo en navegación, se contempla un 95% del tiempo total del buque en esa condición, cuando el consumo eléctrico es más bajo. El 5% del tiempo restante se dedica a las maniobras, donde el consumo eléctrico es el máximo. Teniendo en cuenta los consumos eléctricos:

$$\text{Porcentaje total de ahorro energético} = 2,6\% * 0,95 + 1,3\% * 0,05 = 2,54\%$$

A lo largo de la vida útil del buque, la potencia eléctrica entregada por el grupo de motores Stirling será el 2,54% de la potencia eléctrica total necesaria.

$$\text{Dinero total ahorrado} = 95\% * 1,39M\text{€} + 5\% * 1,39M\text{€} = 1,39M\text{€}$$

A continuación, se estudia el periodo de amortización de la planta Stirling:

Amortización		
Tiempo en maniobra		5 %
Tiempo en navegación		95 %
Ahorro real en 25 años		1390482 \$
Inversión inicial		
Motores Stirling		52000 \$
Mantenimiento		15600 \$
Instalación bancada		3000 \$
Adaptación eléctrica grupo Stiling-Buque		5000 \$ +
Coste total inversión		
		75600 \$
Amortización de la inversión inicial		
		4,00 años

Ilustración 6-26. Simulación informática. Amortización, instalación en chimenea²¹

²¹ Debido a la poca información sobre precios de instalaciones de motores Stirling, el coste se ha estimado duplicando el coste de una instalación de igual potencia de un grupo electrógeno Diésel. Los gastos de mantenimiento se estiman en el 30% del coste total del motor a lo largo de toda su vida útil. También se reflejan la aproximación de los costes de instalación y adaptación eléctrica.

Gasto total de combustible para MMAA por año											
	Año										
Combustible	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Navegación [T]	1,159E+03	1,159E+03	1,159E+03	1,159E+03	1,159E+03	1,159E+03	1,159E+03	1,159E+03	1,159E+03	1,159E+03	1,159E+03
Maniobra [T]	1,220E+02	1,220E+02	1,220E+02	1,220E+02	1,220E+02	1,220E+02	1,220E+02	1,220E+02	1,220E+02	1,220E+02	1,220E+02
Precio [\$/T]	592,25	680	726,67	773,33	820	865	910	955	1000	1123	1247
Coste											
Anual [\$]	7,587E+05	8,712E+05	9,310E+05	9,907E+05	1,051E+06	1,108E+06	1,166E+06	1,223E+06	1,281E+06	1,439E+06	1,598E+06
Ahorro anual [\$]	1,920E+04	2,204E+04	2,355E+04	2,507E+04	2,658E+04	2,804E+04	2,950E+04	3,095E+04	3,241E+04	3,640E+04	4,04E+04
Amortizacion	8,986E+04 \$ ahorrados en 4 años			Para el año 2023, la inversión inicial está amortizada							

Ilustración 6-27. Simulación informática. Ahorro anual de combustible, instalación en chimenea²²

El tiempo de amortización de la planta recuperadora Stirling es aproximadamente de 4 años, debido al coste del combustible marino en los próximos años.

6.3.2.2. Buque con menor vida útil

Como se ha demostrado en el apartado anterior, la incorporación de una planta regeneradora resulta económicamente viable. Es una inversión que se recupera relativamente rápido en buques mercantes de gran porte, con espacio para acoplar estos motores en las chimeneas. También han de estar gran parte de su vida útil navegando, para amortizar el bajo porcentaje energético que generan con el coste del combustible ahorrado en un periodo de tiempo razonable. Así que, en buques con poca vida útil restante, no resultaría viable esta instalación, ya que interesaría aprovechar al máximo el ahorro que las maquinas Stirling proporcionan, no solo cubrir la inversión inicial. Por eso, para buques con esperanzas de vida mayores a 15 años, que estén gran parte del tiempo en navegación, es interesante el estudio de una instalación similar para aprovechar el calor desperdiciado por los escapes.

6.4. Aprovechamiento de calor residual mediante circuito de refrigeración

Otro punto de interés para el aprovechamiento del calor residual de los buques es el circuito de refrigeración. Todos los motores térmicos necesitan rebajar su temperatura interna para no sobrecalentarse. La gran mayoría de motores de combustión interna que encontramos a bordo de buques, reducen la temperatura mediante circuitos de refrigeración por agua. Acostumbran a tener la siguiente configuración:

²² Coste estimado del combustible IFO 380 en los próximos años, véase apartado 5. Tendencia de los precios de los combustibles.

- Un circuito cerrado de agua dulce, encargado de refrigerar el motor
- Un circuito abierto de agua salada, encargado de refrigerar el agua dulce del circuito cerrado
- Un intercambiador térmico
- Bombas
- Filtros
- Tanque de compensación

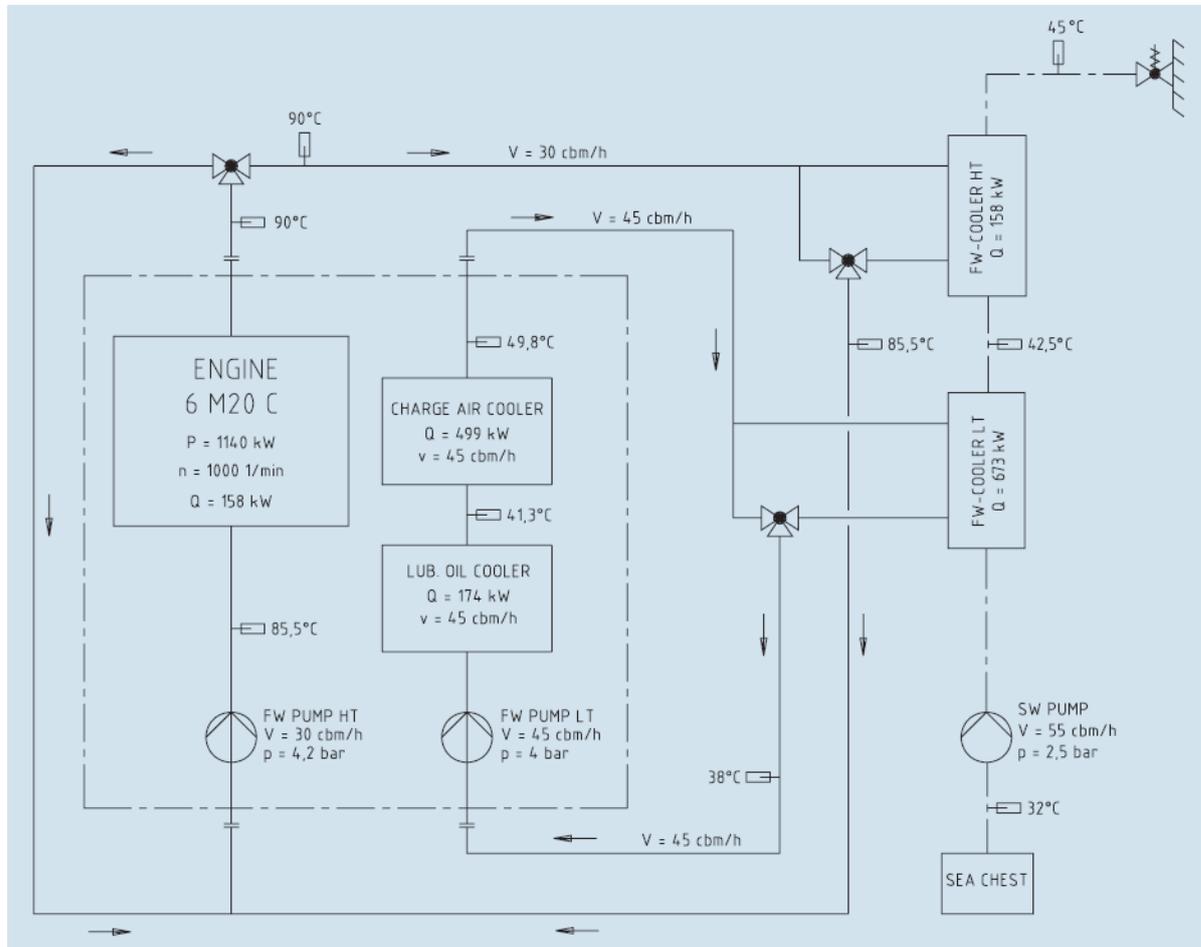


Ilustración 6-28. Circuito de refrigeración del motor CAT 6M20C²³

El agua dulce que sale del motor hacia el intercambiador tiene un gradiente térmico que, al ser enviado al intercambiador, se desperdicia pasando esa energía del agua dulce al agua salada del circuito abierto. Ese gradiente térmico acaba en el mar y no se aprovecha. Acoplando un motor Stirling el en circuito de

²³ 2018. Caterpillar Marine Power Systems. https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/marine-power-systems/commercial-propulsion-engines/18536620.html

refrigeración del motor, se podría aprovechar ese calor procedente de la combustión en el interior del motor.

6.4.1. Dimensionamiento de planta regenerativa en circuito de refrigeración

Para investigar la viabilidad de dicha cuestión, se procede a dimensionar la potencia generada por un grupo de motores Stirling de tipología Alpha alimentados por el calor del agua dulce del circuito de refrigeración cuando este pasa al intercambiador térmico. Para el siguiente ensayo, se tomará como referencia un buque al cual se le acoplan 4 motores Stirling en el circuito de refrigeración. La salida de refrigeración del motor se by-pasea para poder hacer fluir el agua caliente procedente del motor hacia los focos calientes de las maquinas Stirling. La toma de agua salada del circuito de refrigeración es by-paseada, antes de que esta llegue al intercambiador de calor, hacia los focos fríos de los motores Stirling.

Especificaciones del circuito de refrigeración:

Refrigeración por agua			
Dulce		Salada	
Caudal	30 m ³ /h	Caudal	55 m ³ /h
T ^a entrada		T ^a entrada	10-
al motor	85,5 °C	al intercambiador	30 °C
T ^a salida		T ^a salida	
al motor	90 °C	del intercambiador	+10 °C
Presión	4,2 bar	Presión	2,5 bar

Tabla 17. Características del circuito de refrigeración del motor CAT 6M20C

Posteriormente, se procede a la simulación informática del comportamiento de los motores Stirling. Los generadores presentan la misma cilindrada, carrera y diámetro que los empleados en la anterior emulación:

Motores Stirling Alpha pequeños	Unidades	
Unidades	4	
Volumen conjunto motor	1	m ³
Diámetro	0,265	m
Carrera	0,265	m
Cilindrada total	0,029	m ³
Potencia unitaria	1290,656	W
Potencia mecánica	5162,624	W
Potencia eléctrica	4646,36135	W

Tabla 18. Características de motores Stirling acoplados en el circuito de refrigeración

Características del motor					
Magnitud	Abreviatura		Unidades		Unidades SI
Volumen de carrera del cilindro desplazador (Hot)	Vse	14544,4074	cm ³	0,01454441	m ³
Volumen de carrera del cilindro de trabajo (Cold)	Vsc	14544,4074	cm ³	0,01454441	m ³
Volumen del PMS en cilindro desplazador (Hot)	Vde	3636,10185	cm ³	0,0036361	m ³
Volumen del PMS en cilindro de trabajo (Cold)	Vdc	3636,10185	cm ³	0,0036361	m ³
Volumen del regenerador	Vr	3636,10185	cm ³	0,0036361	m ³
Ángulo de desfase entre pistones	dx	97,478	º	1,70136241	rad
Temperatura en foco caliente	Th	80	ºC	353,16	K
Temperatura en foco frío	Tc	21	ºC	294,16	K
Presión media de trabajo	P	101,3	kPa	101300	Pa
Velocidad angular del motor	n	400	rpm	6,66666667	rps

Otros datos obtenidos			
Datos	Abreviatura		Unidades
Ratio V(PMSHot)/V(Hot)	Xde	0,250	
Ratio V(PMSCold)/V(Cold)	Xdc	0,250	
Ratio V(Hot)/V(Cold)	v	1,000	
Ratio temperaturas	t	0,833	
Ratio V(Regenerador)/V(Hot)	Xr	0,250	
Ángulo de desfase de temperaturas	a	54,672	º
N1	S	3,204	
N2	B	1,797	
Ratio N2/N1	c	0,561	
Temperatura regenerador	Tr	50,500	ºC

Ilustración 6-29. Simulación informática, circuito de refrigeración

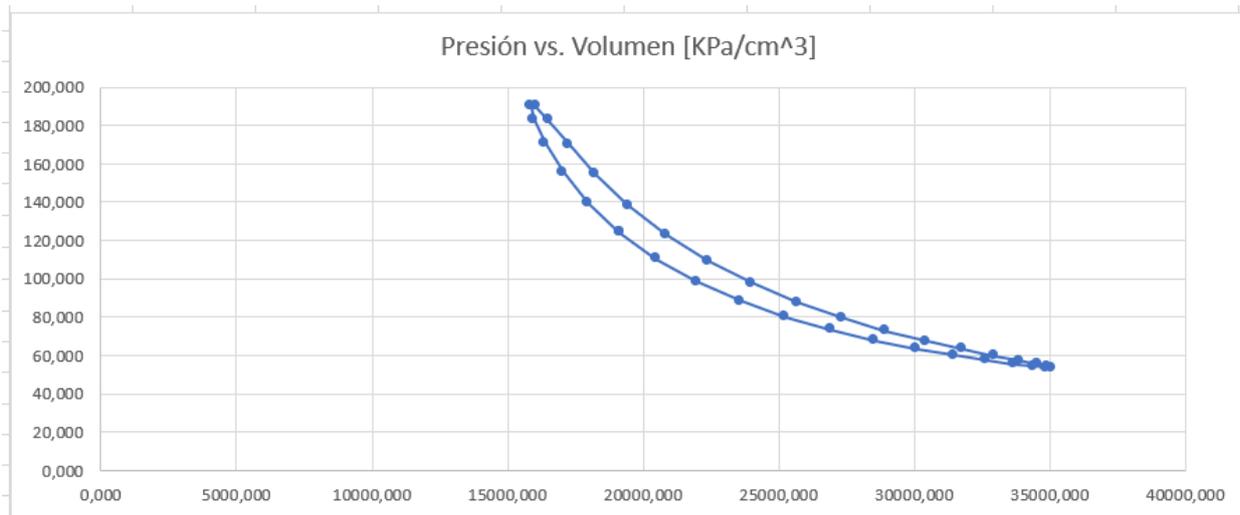


Ilustración 6-30. Simulación informática. Gráfica P-V, circuito de refrigeración

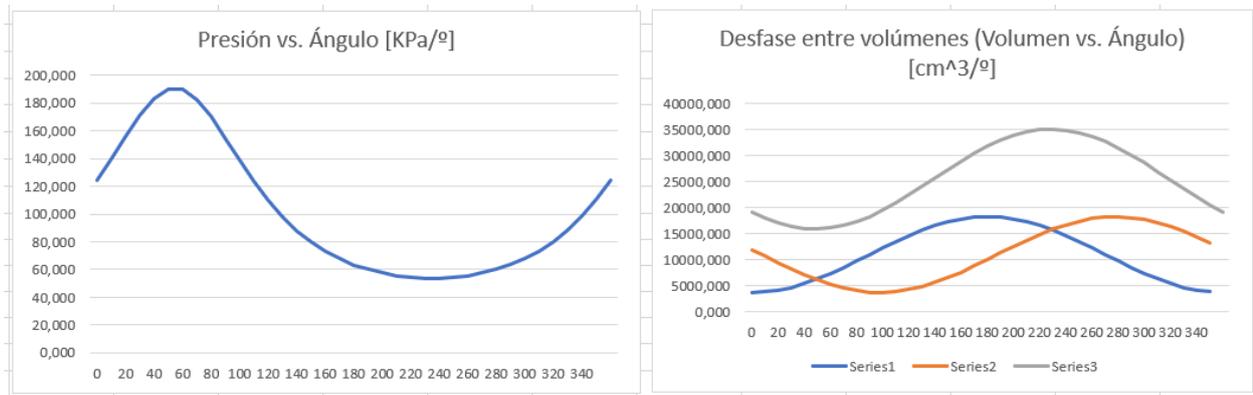


Ilustración 6-31. Simulación informática. Diagrama P-Ángulo y Desfases entre volúmenes, circuito de refrigeración

Resultados obtenidos mediante la simulación		
Trabajo		
We	1158,834	J/vuelta
Wc	965,236	J/vuelta
Wi	193,598	J/vuelta
Rendimiento		
e	16,706	%
Potencia		
Le	7725,560	W
Lc	6434,904	W
Li	1290,656	W

Ilustración 6-32. Simulación informática. Rendimiento y potencia del motor, circuito de refrigeración

Ahorro y amortización, navegación		
Buque con MMAA Cat 6 M 20 C, 1 unidad		
P. eléctrica generada	979	Kw
Cee	189	g/kW*h
Porcentaje tiempo en uso	0,85	
Vida útil del buque	25	años
Combustible necesario		
en 25 años	3,589E+04	Tm
Precio IFO 380 *	1489,69	\$/Tm
Coste total de combustib	5,346E+07	\$
Energía eléctrica ahorrada	0,40	%
Dinero ahorrado	215660 \$ en 25 años	
Ahorro en maniobra, mayor consumo eléctrico		
Buque con MMAA Cat 6 M 20 C, 2 unidades		
P. eléctrica generada	1958	Kw
Cee	189	g/kW*h
Porcentaje tiempo en uso	0,85	
Vida útil del buque	25	años
Combustible necesario		
en 25 años	3,589E+04	Tm
Precio IFO 380 *	1489,69	\$/Tm
Coste total de combustib	5,346E+07	\$
Energía eléctrica ahorrada	0,20	%
Dinero ahorrado	107830 \$ en 25 años	

Ilustración 6-33. Simulación informática. Porcentajes y Ahorros, circuito de refrigeración

Amortización	
Tiempo en maniobra	5 %
Tiempo en navegación	95 %
Ahorro total en 25 años	210269 \$
Inversión inicial	
Motores Stirling	15440 \$
Mantenimiento	4632 \$
Instalación bancada	1000 \$
Adaptación eléctrica	
grupo Stiling-Buque	4000 \$ +
Coste total inversión	
	25072 \$
Amortización de la inversión inicial	7,00 años

Ilustración 6-34. Simulación informática. Amortización, circuito de refrigeración

Tiempo necesario para la amortización					
Año	Precio [\$/Tm]	Toneladas usadas [T/año]	Dinero gastado [\$/año]	Ahorro [\$/año]	Años para amortización
2049	3230	1435	4636471	18082	
2048	3000	1435	4306320	16795	
2047	2875	1435	4126890	16095	
2046	2750	1435	3947460	15395	
2045	2625	1435	3768030	14695	
2044	2500	1435	3588600	13996	
2043	2394	1435	3436084	13401	
2042	2288	1435	3283569	12806	
2041	2181	1435	3131053	12211	
2040	2075	1435	2978538	11616	
2039	1979	1435	2840975	11080	
2038	1883	1435	2703412	10543	
2037	1788	1435	2565849	10007	
2036	1692	1435	2428286	9470	
2035	1596	1435	2290723	8934	
2034	1500	1435	2153160	8397	
2033	1468	1435	2106508	8215	
2032	1435	1435	2059856	8033	
2031	1403	1435	2013204	7851	
2030	1370	1435	1966553	7670	
2029	1247	1435	1789515	6979	
2028	1123	1435	1612477	6289	
2027	1000	1435	1435440	5598	
2026	955	1435	1370845	5346	
2025	910	1435	1306250	5094	En 7 años
2024	865	1435	1241655	4842	la instalación
2023	820	1435	1177061	4591	está
2022	773	1435	1110074	4329	amortizada
2021	727	1435	1043086	4068	
2020	680	1435	976099	3807	\$ totales
2019	592	1435	850139	3316	30047

Ilustración 6-35. Simulación informática. Ahorro anual de combustible, circuito de refrigeración

Los resultados obtenidos demuestran que, al acoplar los motores Stirling al circuito de agua dulce, se obtiene un gradiente térmico aprovechable para estas máquinas. En este caso, el salto térmico es mucho menor que en el ensayo anterior. Debido a este factor, el rendimiento es sumamente bajo, menor al 17%, pero al tratarse de energía limpia, siempre será bien recibida. Respecto a la inversión inicial, se estima una amortización a 7 años. Cifra aproximada, debido a la extrapolación del precio de los carburantes en un futuro y a la dificultad de encontrar fabricantes de motores Stirling industriales hoy en día, y aún mayor dificultad para conocer sus precios. Teniendo en cuenta que la vida útil estimada de un buque mercante nuevo es de 25 años, esta inversión es rentable, ya que aproximadamente a algo menos de una tercera parte de la vida útil del buque, la inversión estará recuperada. No son solo beneficios económicos, sino que se estará reduciendo la huella de carbono que el buque genera.

7. Conclusiones

El motor Stirling posee un amplio potencial de uso, desarrollo y mejora. Se trata de una máquina térmica muy sencilla, que requiere de un menor mantenimiento que otras máquinas. Con un amplio catálogo de combustibles a escoger, estamos frente un motor muy versátil respecto a escenarios de aplicación. Sus características más relevantes son: Ser la única maquina térmica reversible y poseer el mayor rendimiento termodinámico teórico de todas ellas, pues alcanza el rendimiento de Carnot. Estos dos factores son clave para su desarrollo futuro. Aunque llevan prácticamente un centenario en el olvido, el interés generado en las últimas décadas por las energías renovables, una mayor conciencia medioambiental, y sobre el ahorro energético, han logrado que aumente su investigación, desarrollo e interés.

Las simulaciones realizadas en este trabajo de fin de grado demuestran que:

Las maquinas Stirling presentan mayor rendimiento que sus homólogos de combustión interna. En la emulación del apartado 6.1.1.1. Buque de tamaño medio, se ha alcanzado un rendimiento del 67,7%, cuando los motores navales más optimizados de hoy en día logran rendimientos del 52% (véase la ilustración 6-8).

La tipología Alpha resulta ser la más idónea para motores de medianas y grandes potencias, debido a su rendimiento y a su menor complejidad constructiva, factor clave para abaratar su coste de fabricación y mantenimiento. La presurización del gas de trabajo mejora su potencia, aunque complica la construcción y la estanqueidad.

La cilindrada del motor Stirling es mayor a la de sus homólogos actuales de combustión interna para conseguir potencias equiparables. Hecho comprobable en el apartado 6.1.1.2. Embarcación pequeña, donde la cilindrada requerida por el motor Stirling es 6,27 veces la del motor de ciclo Diésel para igualar la potencia del propulsor original (véanse las tablas 11 y 12). Utilizándolo como motor principal en un buque, necesitaríamos una sala de máquinas de dimensiones mucho mayores. No es rentable sacrificar espacio de carga y bodegas para ampliar la sala de máquinas. En el apartado 6.2.1. Dimensionamiento para generación eléctrica, se ha comprobado que un motor Stirling con igual cubicaje que el MA original, solo genera el 47,38% de la potencia del motor original de ciclo Diésel. El costo de fabricación del motor también es un inconveniente, es aproximadamente el doble del de un motor de ciclo Diésel de igual potencia. Por estas razones no vemos hoy en día buques propulsados por motores Stirling, como tampoco con MMAA de igual ciclo de trabajo.

La principal desventaja de ser una máquina de combustión externa es la demora en la puesta en marcha del motor y el prolongado tiempo en los cambios de régimen. Por eso, la aplicación de estos motores en vehículos de carretera es muy inviable. En el mundo naval, las arrancadas suelen ser programadas, por lo que el tiempo necesario para el arranque no debería ser un problema. Los cambios de velocidad en los buques son lentos, por lo que la mayor demora en los cambios de régimen no debería entorpecer su uso en el sector naval.

La principal ventaja de ser una máquina de combustión externa es que puede tomar calor de cualquier combustible. Factor clave para utilizarse como aprovechadora de calor residual. Desde la invención de los motores de combustión interna, el calor acumulado en su interior ha sido un inconveniente. Las maquinas Stirling pueden beneficiarse de este problema. Al utilizar calor residual de motores de combustión interna, se puede reaprovechar su energía en forma de gradiente térmico para generar movimiento mediante la

maquina Stirling. Acoplado los focos cálidos de los motores Stirling a fuentes de calor residual, como chimeneas o circuitos de refrigeración, obtenemos el gradiente térmico necesario para que la maquina Stirling funcione. Esta, unida a un alternador, es capaz de generar energía limpia, procedente de un gradiente térmico que se iba a desperdiciar. Puede que, comparado con las máquinas de combustión interna, la potencia generada sea poca, pero es energía reaprovechada. Resulta ser una instalación con vistas a una amortización a un plazo medio-largo, tal y como se ha estudiado en el apartado 6.3. Aprovechamiento de calor residual. Resulta ser una instalación viable en buques de nueva construcción, o con una larga esperanza de vida por delante, el instalar un grupo de motores Stirling para el aprovechamiento de calor residual. Teniendo en cuenta el incremento de los precios de los combustibles fósiles en un futuro cercano (véase el apartado 5. Tendencia de los precios de los combustibles), el periodo de amortización se reduce significativamente. En buques con poca esperanza de vida no resultaría viable, ya que son inversiones con vistas a ser amortizadas en, mínimo, un lustro.

La viabilidad del uso de máquinas Stirling en buques solo resulta útil en mercantes de tamaños medios y grandes, pues se requiere de un amplio espacio disponible en chimeneas para obtener una potencia eléctrica aprovechable. O de una sala de máquinas con espacio para instalar una planta Stirling en la refrigeración de los motores de combustión interna. El buque ha de estar prácticamente la totalidad del tiempo navegando, para que los motores Stirling generen la mayor cantidad de energía eléctrica posible para acortar el periodo de amortización y ahorrar la mayor cantidad de combustible y dinero. También implicaría un gran beneficio para el planeta, quemando una menor cantidad de combustible para generar electricidad en los MMAA, se emiten menos gases contaminantes a la atmósfera y se reduce el impacto sobre el planeta que la industria naval genera.

8. Bibliografia

- Jesús A. Álvarez Flores, Ismael Callejón i Agramunt, Pere Roca i Carles. 1997. El motor Stirling, Barcelona: Publicacions d'Abast.
- Yanus A. Çengel, Michael A. Boles. 2006. Termodinámica, D.F. México: Mc Graw-Hill.
- Frank Kreith, Mark S. Bohn. 2001. Principios de Transferencia de Calor, D. F. México: Thomson Learning.
- Frank P. Incropera, David P. DeWitt. 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Nueva York: John Willey & Sons.
- José Antonio Carta González, Roque Calero Pérez, Antonio Colmenar Santos, Manuel-Alonso Castro Gil, Eduardo Collado Fernández. 2013. Centrales de energías renovables, Madrid: Pearson Educación.
- Daniel Carbonero Mesas. 2003. Motores de combustión interna y turbinas de gas, Sant Adrià de Besós.
- Noel P. Nightingale. 1986. Automotive Stirling Engine, Cleveland.
- Koichi Hirata. (s/f). Schmidt theory for Stirling engines.
- José M^a Sala Lizarraga. 1999. Cogeneración, Bilbao: Servicio Editorial Universidad del País Vasco.
- Juan Pedro Soler Cazorla. 2014. Estudio de viabilidad de la implantación de un motor Stirling utilizando el calor residual de un buque. Facultad de Náutica de Barcelona.
- R.W. Haywood. 1991. Analysis of Engineering Cycles, Oxford: Pergamon Press.
- CAT Marine Engine Selection Guide. 2016. Caterpillar.

9. Webgrafía

- <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/stirling-un-motor-cuyo-combustible-es-solo-calor/20130226180646004970.html> (15/03/2018)
- <http://www.stirlinginternational.org/docs/presentations/history.asp> (15/03/2018)
- <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/> (15/03/2018)
- https://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/strlng1.htm (15/03/2018)
- <http://www.sfu.ca/~mbahrami/ENSC%20461/Notes/Stirling%20Cycle.pdf> (29/03/2018)
- http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo_de_Stirling#Rendimiento (29/03/2018)
- http://www.transformacni-technologie.cz/en_36.html (01/04/2018)
- <https://www.dvidshub.net/image/859381/mod-ii-automotive-stirling-engine> (01/04/2018)
- https://www.seas.es/blog/disenio_mecanico/ventajas-y-desventajas-de-un-motor-stirling/ (01/04/2018)
- <https://saab.com/naval/submarines-and-warships/technologies/the-stirling-engine/> (10/04/2018)
- <http://stirlingengineforum.com/viewtopic.php?t=1618> (03/05/2018)
- <https://www.pinterest.es/pin/826621706577115470/> (03/05/2018)
- <http://www.curbsideclassic.com/bus-stop-classic/bus-stop-classic-1970-daf-jonckheere-its-first-power-unit-was-a-philips-stirling-engine/> (10/05/2018)
- <http://www.ufrgs.br/criogenia/imagens/stirlingcycle> (19/05/2018)
- http://aut.researchgateway.ac.nz/bitstream/handle/10292/4942/Stirling-Cycle%20Heat-Pumps%20and%20Refrigerators%20%E2%80%93%20a%20Realistic%20Alternative_IHRACE%202002.pdf?sequence=2&origin=publication_detail (19/05/2018)
- <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/academic/schmidt/schmidt.htm> (03/06/2018)
- <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/isothermal/Schmidt.pdf> (03/06/2018)
- https://www.researchgate.net/publication/319666151_Review_of_Existing_Models_for_Stirling_Engine_Performance_Prediction_and_the_Paradox_Phenomenon_of_the_Classical_Schmidt_Isothermal_Model (03/06/2018)
- <https://www.hafen-hamburg.de/en/vessel/opdr-tanger-imo-9389306---28916> (11/09/2018)
- <http://norta.net/en1/catalog/engines/> (11/09/2018)
- <https://glomeep.imo.org/technology/exhaust-gas-boilers-on-auxiliary-engines/> (28/09/2018)
- <https://www.marineinsight.com/main-engine/exhaust-gas-system-of-main-engine-on-ship/> (01/10/2019)
- <http://www.marinedieseurope.com/blog/2015/02/02/pyrometers-and-exhaust-gas-temperature/> (01/10/2019)
- <https://shipandbunker.com/prices#IFO380> (01/10/2018)

https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart	(01/10/2018)
https://www.ventageneradores.net/grupos-electrogenos	(05/10/2018)
http://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/Sulzer%20SRTA84C-96C.pdf	(05/10/2018)
http://www.machineryspaces.com/cooling.html	(07/10/2018)
https://www.kelvion.com/industries/market/marine/	(07/10/2018)
https://www.marineinsight.com/guidelines/general-overview-of-central-cooling-system-on-ships/	
https://www.dieselnet.com/standards/us/nonroad.php#tier3	(10/10/2018)