

UNIVERSIDADE UNICURITIBA

CAMPUS PINNHEIRINHO

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

IGOR FELIPE DE AMORIM CASTOLDI – 171720670
LUCAS DE BASTOS FURLANETTO – 171720284
MATHEUS HENRIQUE IZANFAR HAMILTON – 171720383

CURITIBA
2022

UNIVERSIDADE UNICURITIBA CAMPUS PINNHEIRINHO

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**IGOR FELIPE DE AMORIM CASTOLDI
LUCAS FURLANETTO
MATHEUS HENRIQUE IZANFAR HAMILTON**

Funcionamento e Aplicação de Motores Stirling

Trabalho de Conclusão de Curso entregue à
Universidade UNICURITIBA como requisito
parcial para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Daniel Paiter de Oliveira
Coordenador: Prof. Juliana de Oliveira

CURITIBA
2022

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus e Nossa Senhora, que, em meio a tantas adversidades, ouviram e atenderam as nossas orações.

Agradecemos aos nossos familiares por todo apoio prestado, em especial aos nossos pais, esposa e namorada.

Agradecemos à instituição de ensino UniCuritiba pela estrutura disponibilizada. Ao professor orientador deste trabalho Daniel Paiter, e aos seus colegas de docência que também foram influentes neste estudo. Aos colegas de sala que compuseram esta equipe, sendo pilares para a finalização deste curso.

RESUMO

O objetivo deste artigo consiste na apresentação da construção e desenvolvimento do motor Stirling. Nesta apresentação serão abordados temas como a história do motor, funcionamento, componentes, suas particularidades e inovações, as vantagens e desvantagens da sua aplicação em relação a outros agentes como os motores a combustão e uma análise profunda desse tipo de máquina, tendo como princípio o ciclo de Carnot.

Palavras-Chaves: Stirling, ciclo de carnot, desenvolvimento, ecologia, energia.

ABSTRACT

The purpose of this article is to present the construction and development of the Stirling engine. In this presentation, topics such as the history of the engine, operation, components, its particularities and innovations, the advantages and disadvantages of its application in relation to other agents such as combustion engines and a deep analysis of this type of machine, based on the principle of Carnot cycle.

KEY WORDS: Stirling, carnot cycle, development, ecology, energy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	07
1.1	Objetivos e Motivação	07
1.2	Contribuições Esperadas	07
2	MOTOR STIRLING	08
2.1	Breve história do Motor Stirling	08
2.2	O ciclo Teórico	09
2.3	O Regenerador e os trocadores de calor, peça chave na operação	10
3	Análises do ciclo teórico de Stirling	10
4	Configurações dos Motores Stirling	12
4.1	Configurações com múltiplos cilindros	13
4.2	Motores Stirling de baixo diferencial de temperatura	13
4.3	Pistão, Cilindro ou Deslocador livre	14
5	Aplicações do Motor Stirling	14
5.1	Bomba de Água	15
5.2	Produção de Eletricidade	15
5.3	O Motor Stirling na impulsão de submarinos	16
5.4	Aplicação na Refrigeração	17
6	Considerações Finais	17
7	Referências Bibliográficas	18

1 Introdução

Com a Revolução Industrial inicia-se um grande avanço na ciência e na engenharia que desencadeia a produção, produzindo um grande aumento na mesma. A máquina a vapor é essencial para entender esse fenômeno e seu desenvolvimento marca um grande avanço nas máquinas térmicas. O princípio de todo motor é converter energia em trabalho mecânico útil. Já desde o início do século XX, os motores de combustão interna (que são baseados no ciclo Otto e Diesel) têm desempenhado um papel de liderança porque podem ser produzidos em massa de forma barata e com uma grande variedade de tamanhos, e também é possível implementá-los em grande número de aplicações. Atualmente, no entanto, as condições mudaram: eles estão em destaque devido à poluição que seu uso acarreta, embora seja verdade que grandes esforços têm sido feitos para reduzi-la, e seu uso de combustíveis fósseis, fator muito relevante hoje. Essa preocupação com o meio ambiente e a busca por tecnologias mais limpas representam as condições para o desenvolvimento de motores alternativos que atendam a essas necessidades. Uma das alternativas possíveis é o motor Stirling, que surgiu pela primeira vez em 1816 como substituto do motor a vapor. É um motor de combustão externa que parece combinar a eficiência com certas características que o tornam muito interessante, como a possibilidade de usar combustíveis não fósseis devido à combustão externa, que por sua vez é mais limpa, pois é realizada inteiramente em uma câmara separada e não dentro do cilindro.

A seguir, será realizada uma exposição desses motores e seu desenvolvimento ao longo do tempo com diferentes aplicações, podendo dividir o artigo nestas duas partes: uma primeira em que serão expostas características gerais dos motores e outra no qual demonstrará as suas diversas aplicações.

1.1 Objetivos e Motivação

Este artigo tem como objetivo apresentar todo o contexto histórico, teórico, e crítico sobre o funcionamento, desenvolvimento e aplicações positivas e negativas dos motores Stirling. Após o início do século XXI, em busca de uma agenda ambiental e de programas que visem a preservar a estrutura do planeta, vemos esse registro como uma forma para apresentar o que pode ser considerado como a máquina térmica de melhor aproveitamento possível, sendo comprovado pelo ciclo de Carnot. A curiosidade e o motivo da publicação do artigo, ocorreu após as aulas de termodinâmica, da capacidade e eficiência que uma máquina térmica como a criada por Robert Stirling seja tão desconhecida e subvalorizada nos ambientes acadêmicos. Até para o estudo e programação do artigo, foi notória a dificuldade da falta de informações sobre o assunto, quando a imensa maioria dos registros acadêmicos se baseiam sobre os ciclos de Diesel e Otto, sendo o ciclo de Carnot uma alternativa para tentar agir e solucionar os problemas atuais no setor ambiental, energético e petrolífero, não havendo outras alternativas no momento presente.

1.2 Contribuições esperadas

- a) A história de Robert Stirling;
- b) Surgimento e desenvolvimento do primeiro motor Stirling;
- c) Uma melhor compreensão sobre as aplicações positivas e negativas de sua utilização;
- d) A identificação dos componentes necessários para a construção de um motor Stirling;

- e) Os impactos da sua utilização na cadeia produtiva de operação;
- f) Sugestões futuras para novas adições a este trabalho.

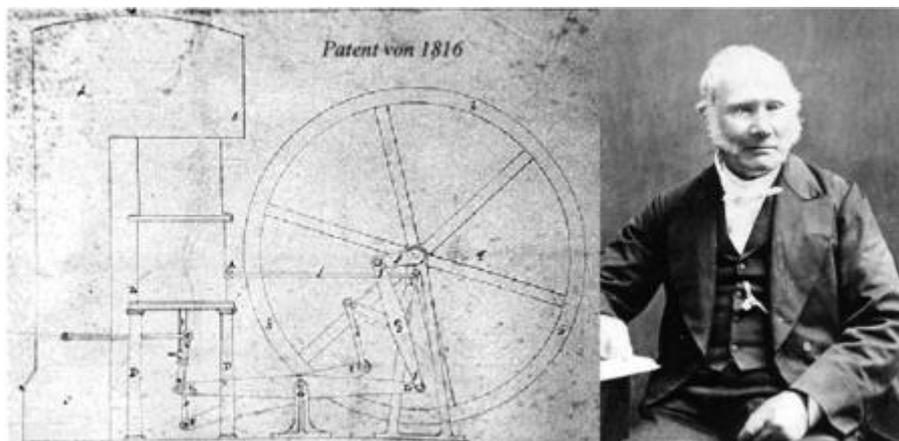
2 Motor Stirling

O motor Stirling é um motor térmico de combustão externa que funciona seguindo um ciclo fechado e regenerativo chamado de Ciclo Stirling, no qual é produzida uma compressão e expansão do fluido de trabalho em diferentes temperaturas. A maneira mais geral pela qual um motor Stirling pode ser definido são dois espaços entre os quais há um regenerador e trocadores de calor auxiliares, cada uma das zonas tendo uma temperatura diferente (uma mais alta que a outra) e sendo fechada entre dois cilindros, causando seu movimento (Walker, 1973). O fluido normalmente será ar, hidrogênio ou hélio (Vineeth, 2012) e também existem diferentes configurações.

2.1 Breve história do Motor Stirling

O motor foi inventado escocês Robert Stirling para substituir o motor a vapor e foi introduzido em 1816, quando ele registrou uma patente junto com seu motor. A Figura 1 mostra uma adaptação do desenho apresentado na patente. Segundo Beale (1985) o produto teve algum sucesso comercial como no acionamento para bombas d'água de baixa potência durante o século XIX até ser gradualmente substituído por motores de combustão interna devido à sua maior potência e menor preço. Caindo no esquecimento no início do século XX.

Figura 1 - Robert Stirling



Fonte: Google

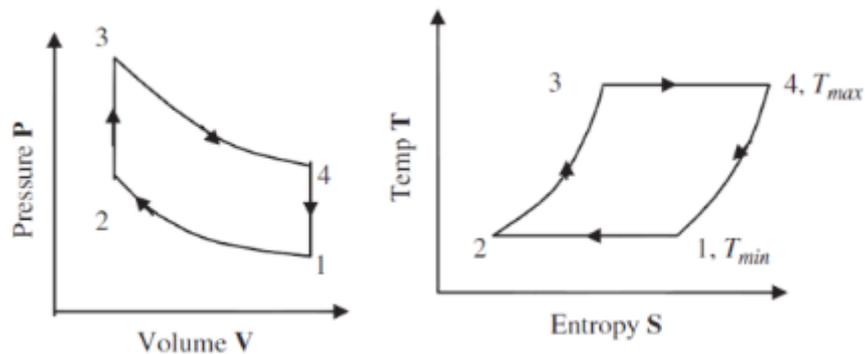
O motor Stirling reapareceria por volta do ano de 1937 (Kongtragool & Wongwises, Performance of low-temperature diferencial Stirling engines, 2007) com as investigações do Philips Research Laboratory em Eindhoven (Holanda). William Beale (1985) aponta que após a Segunda Guerra Mundial o produto voltou a chamar a atenção, pois os avanços ocorridos na engenharia (por exemplo, o uso do aço inoxidável) e um maior conhecimento da física dos fluidos e da termodinâmica permitiram obter maior poder, reduzindo custos e tamanho. Mais avanços foram feitos recentemente e, como será visto mais adiante, o motor Stirling dispõe de mais aplicações.

Um desenvolvimento impressionante é o dos motores Stirling de baixa diferença de temperatura, que operam com uma baixa diferença entre as duas zonas de trabalho. Vineeth (2012) escreve que o primeiro foi apresentado por Ivo Kolin, da Universidade de Zagreb, em 1983 e funcionou com um diferencial de 100°C. Mais tarde, o professor James Senft apresentaria um motor que pode trabalhar com diferencial de até 0,5°C (Kongtragool & Wongwises, 2003).

2.2 O Ciclo Teórico

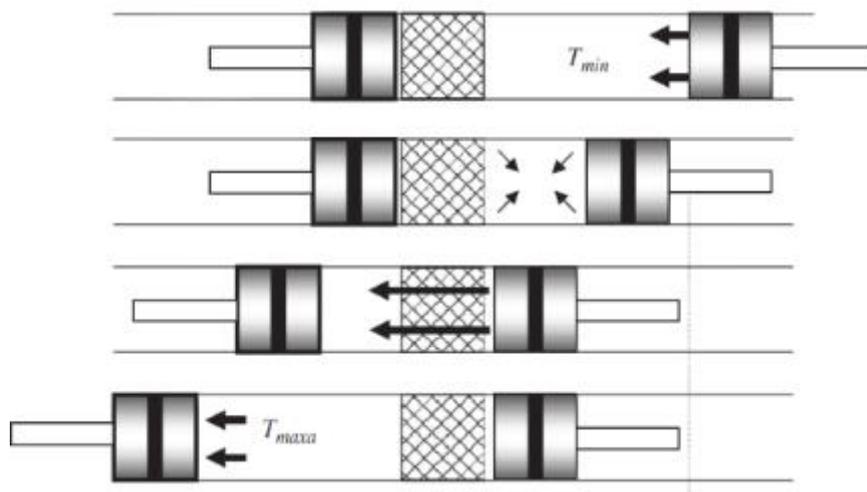
O seguinte ciclo termodinâmico teórico consiste em quatro processos. A representação do ciclo e uma representação gráfica para ajudar a compreendê-lo são mostradas nas Figuras 2 e 3. A seguir, o ciclo teórico de Stirling será brevemente explicado.

Figura 2 - Diagrama PV e TS do ciclo do motor Stirling



Fonte: Thombare & Verma, 2008

Figura 3 - Diagrama do funcionamento do motor Stirling



Fonte: Thombare & Verma, 2008

Thombarea e Verma (2008) explicam o ciclo de acordo com essas figuras e começam afirmando que a zona de compressão do fluido é aquela localizada à direita do regenerador (onde o fluido está no início) e a zona de expansão está localizada a esquerda.

O primeiro processo (1-2) é uma compressão isotérmica na qual o pistão de compressão se move em direção ao regenerador enquanto o pistão de expansão permanece estático. A temperatura permanece constante porque o fluxo de calor é dissipado para o ambiente devido a um reservatório de temperatura mais baixa (a temperatura mínima).

O segundo processo (2-3) é uma transferência de calor do regenerador de volume constante. Nesse processo, ambos os pistões se movem simultaneamente, ou seja, o pistão de compressão se aproxima do regenerador e o pistão de expansão se afasta, transferindo o fluido entre ambas as zonas, devendo passar pelo regenerador (que, como já foi dito, atua como reserva de calor) aumentando assim a temperatura e a pressão.

O terceiro processo (3-4) é uma expansão isotérmica na qual o pistão de expansão continua a se afastar do regenerador e o pistão de compressão permanece estático. A temperatura é mantida constante por um fluxo de calor de um reservatório à temperatura do ponto quente e do interior do cilindro. Isso aumenta o volume e diminui a pressão. É essa expansão que faz o trabalho efetivo.

O último processo (4-1) é uma transferência de calor de volume constante para o regenerador. Ambos os pistões se movem simultaneamente novamente e o fluido de trabalho passa pelo regenerador, transferindo calor para ele e reduzindo sua temperatura até o ponto frio.

2.3 O Regenerador e os trocadores de calor, peça chave na operação

Como já foi explicado, o ciclo atua entre duas temperaturas de tal forma que elas devem ser mantidas durante os processos. Isto implica a presença de dois elementos: um aquecedor para a zona de alta temperatura e um refrigerador para a zona de baixa temperatura. O aquecedor se encarregará de manter a temperatura na zona quente durante a expansão e para isso receberá a energia produzida na combustão externa por convecção, que será transmitida por condução através das paredes até passar no fluido por convecção. Como apontam Thombarea e Verma (2008), o cálculo para este elemento pode ser complicado. Já o refrigerador será o elemento encarregado de absorver o calor gerado na compressão na zona fria. Os autores citados ressaltam que o refrigerador geralmente consiste em ar ou água para reduzir a temperatura, sendo este último o sistema mais utilizado. Por sua vez, também mencionam que o cálculo deste elemento é mais fácil. Por último, há o regenerador, que é em forma de malha e atua como barreira entre as zonas e como “armazém” de calor. Como já foi dito, Robert Stirling realizou uma patente em 1816 na qual anunciou, junto com seu motor, um elemento chamado economizador, o regenerador. Na explicação do ciclo foi apontado que o regenerador é responsável por armazenar energia ou transferi-la em mudanças a volume constante. Isso pressupõe que a matriz deve ter uma série de características (Thombare & Verma, 2008):

- Grande e sólido para capacidade máxima de calor.
- Pequeno muito poroso para reduzir as perdas de fluxo.
- Pequeno e denso para reduzir o espaço vazio.
- Grande e finamente dividido para maior transferência de calor.
- Livre de obstruções para uma contaminação menor.

Como você pode ver, todos os recursos não são compatíveis, portanto, deve-se buscar uma boa otimização desses parâmetros.

3 Análises do ciclo teórico de Stirling

O ciclo teórico é composto por quatro processos.

A seguir, será avaliada a eficiência do ciclo e observada a importância do trocador de calor.

1. Primeiro processo, compressão isotérmica:

Como a temperatura é mantida, considera-se que a energia interna não varia e, portanto, de acordo com o balanço de energia ($\Delta U=Q-W$) o calor fornecido pelo fluido será igual ao trabalho necessário. Levando em conta a equação do trabalho ($W=\int p \cdot dv$) e a equação do gás ideal ($pV=nRT$), obteremos:

$$Q_{1-2} = W_{1-2} = nRT_{min} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = -nRT_{min} \ln(r)$$

2. Segundo processo, transferência de calor do regenerador de volume constante:

Nesse caso, o fluido passa pelo regenerador, que fornece calor, e nenhum trabalho é realizado. Portanto:

$$Q_{2-3} = mC_v(T_{max} - T_{min})$$

3. Terceiro processo, expansão isotérmica:

É muito semelhante ao primeiro, mas neste caso o calor é absorvido do aquecedor e o trabalho é realizado (é o processo no qual o trabalho é realizado). Por tanto:

$$Q_{3-4} = W_{3-4} = nRT_{max} \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = nRT_{max} \ln(r)$$

4. Quarto processo, transferência de calor para o regenerador de volume constante:

Finalmente, o fluido transfere calor para o regenerador, não realizando trabalho:

$$Q_{4-1} = mC_v(T_{min} - T_{max})$$

Por outro lado, como dissemos, o desempenho do regenerador desempenha um papel importante e deve ser levado em consideração. É por isso que o desempenho do regenerador (ξ) será adicionado e o calor absorvido pelo fluido no segundo processo será considerado:

$$Q_{2-3} = \xi mC_v(T_{max} - T_{min})$$

Portanto, algum calor deve ser fornecido ao fluido para que ele atinja a temperatura máxima e terá um valor de $(1-\xi)mC_v(T_{max}-T_{min})$. Desta forma, o desempenho, que é o trabalho líquido dividido pelo calor fornecido ao fluido, é:

$$\eta = \frac{nRT_{max} \ln(r) - nRT_{min} \ln(r)}{(1-\xi)mC_v(T_{max} - T_{min}) + nRT_{max} \ln(r)}$$

Se a eficiência do regenerador fosse ideal, ou seja, 100%, então:

$$\eta = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Como se vê, o desempenho coincide com o do ciclo Otto, ou seja, o desempenho teórico mais alto possível, embora como já foi visto durante o desenvolvimento, é um modelo altamente teórico e idealizado que depende em grande parte do regenerador. Na prática, como aponta Walker (1973), os motores Stirling não funcionam com o ciclo Stirling, pois é difícil obter compressão ou expansão isotérmica, mesmo que os aquecedores e resfriadores estejam o mais próximo possível, além do fato de que os trocadores de calor tão pouco trabalham com uma eficiência de 100%. Para um cálculo mais próximo da realidade, foram propostas análises menos ideais e mais complexas do que a realizada acima (Martini, 1983) em que são feitas hipóteses mais ajustadas ao que realmente acontece. O primeiro é chamado de ciclo de Schmidt e surgiu em 1871 com Gustaf Schmidt, de quem recebeu o nome. Depois vem o chamado ciclo adiabático de Finkelstein e finalmente Martini expõe o ciclo semi-adiabático utilizado pela empresa Philips, sendo uma das primeiras a se interessar novamente por esse tipo de motor.

4 Configurações dos Motores Stirling

Os elementos que definem os motores Stirling já foram mencionados anteriormente, porém, como também foi apontado, existem muitas combinações que foram desenvolvidas ao longo do tempo. A primeira grande divisão pode ser feita observando o acoplamento no cilindro e pode ser distinguido entre aqueles que usam dois pistões e aqueles que usam um pistão e um pistão deslocador (Walker, 1973). Da mesma forma, também existem configurações com vários cilindros, bem como outras configurações que foram desenvolvidas ao longo dos anos para diferentes aplicações. As três primeiras configurações abaixo são as mais básicas e principais:

- Tipo Alfa:

Considerando a configuração dos elementos dentro do cilindro, temos primeiro os motores alfas. Estes têm dois pistões em cilindros separados conectados pelo aquecedor, regenerador e resfriador. Na figura 4 é representado pela letra c. Segundo Thombare e Verma (1973), embora esta possa ser a configuração mais simples, tem a desvantagem de precisar vedar ambos os cilindros.

- Tipo Beta:

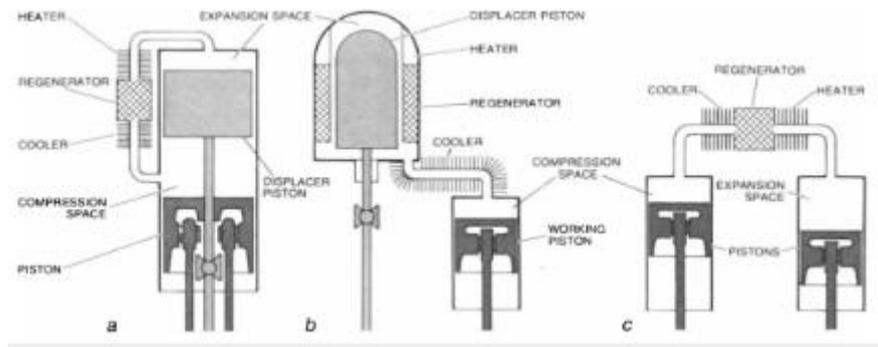
Este tipo de motor usa um pistão deslocador para que ele e o pistão sejam acomodados no mesmo cilindro.

Desta forma, o espaço de compressão é aquele que fica entre a parte superior do pistão que realiza o trabalho e a parte inferior do deslocador. A configuração pode ser vista na figura 4, sendo a imagem a.

- Tipo Gama:

Assim como o tipo beta, ele também usa um deslocador, mas neste caso ambos estão em cilindros separados, então o espaço de compressão é dividido entre os dois cilindros que são unidos para que o aquecedor, resfriador e regenerador fiquem localizados, geralmente entre eles. Novamente pode ser visto na figura 4, imagem b.

Figura 4 - Tipos de motor stirling: alfa (c), beta (a) e gama (b)

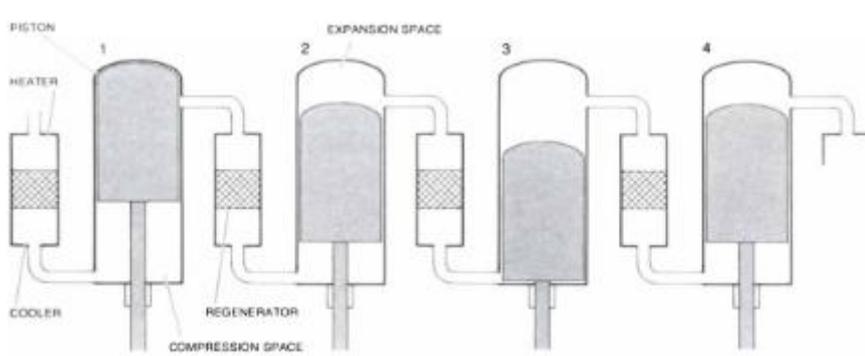


Fonte: Walker, 1973

4.1 Configurações com múltiplos cilindros

Walker (1973) destaca que a união de vários cilindros pode ser realizada para aumentar a potência. O exemplo que ele dá para fazer um motor com essas características é a configuração Rinia (criada por Herre Rinia do Philips Research Laboratories na Holanda). Trata-se da união de cilindros do tipo alfa conectados de tal forma que a união da zona de expansão de um e da zona de compressão do outro seria feita através de trocadores de calor apropriados. Este caso pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Representação da configuração Rinia

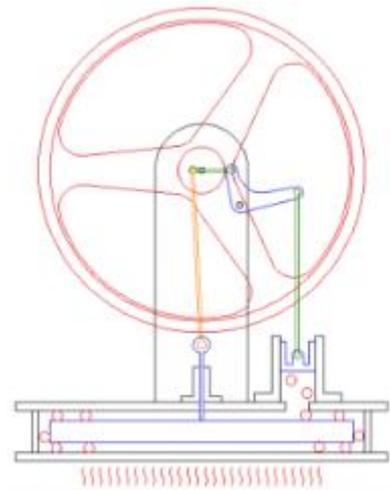


Fonte: Walker, 1973

4.2 Motores Stirling de baixo diferencial de temperatura

Este tipo de motor já foi discutido anteriormente. Como o próprio nome sugere, eles trabalham com uma pequena diferença de temperatura entre as duas zonas, então a fonte de calor não precisa ser muito potente. A Figura 6 mostra um diagrama deste tipo de motores.

Figura 6 - Desenho de um motor de diferença de baixa temperatura

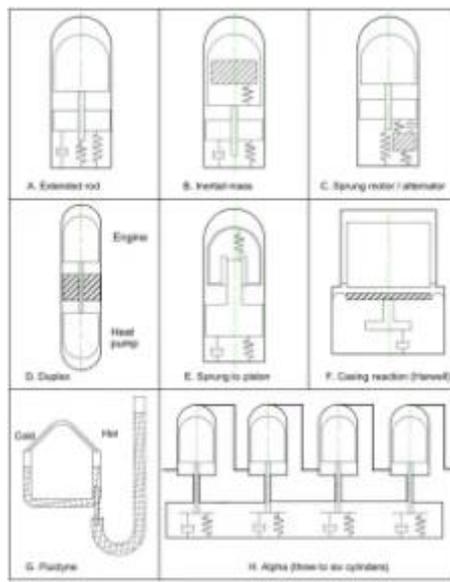


Fonte: Vineeth, 2012

4.3 Pistão, Cilindro ou Deslocador livre

Este tipo de motor foi desenvolvido pela primeira vez por William Beale (Thombare & Verma, 2008). A diferença com os demais é que embora os anteriormente expostos tenham os elementos ligados mecanicamente, eles são acoplados dinamicamente pelo gás, razão pela qual são chamados de "livres". A montagem é semelhante a um motor de pistão deslocador, exceto pela exceção observada. William Beale em um artigo publicado em 1985 descreve as diferentes configurações que podem ser dadas e mostra algumas aplicações que serão discutidas posteriormente. A Figura 7 exhibe diferentes configurações de motores de elemento livre com diferentes métodos para obter movimento alternativo, como molas e um motor Stirling duplo (com dois deslocadores).

Figura 7 - Diferentes configurações de motor com pistão, cilindro e deslocador livres



Fonte: Google

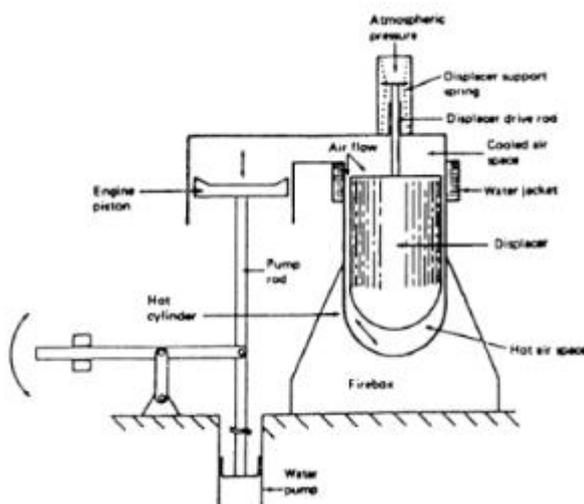
5 Aplicações do Motor Stirling

Até agora, foi feita uma descrição do motor Stirling, consistindo em sua história, a descrição de seus elementos e como eles podem ser configurados, o ciclo, o desempenho, etc. De tudo isso surge algumas considerações que influenciam sua aplicação e a tornam adequada para muitas finalidades. Em primeiro lugar, o fato de ser um motor de combustão externa permite-lhe utilizar uma grande variedade de combustíveis (incluindo combustíveis não fósseis). Thombare e Verma (2008) apresentam outras propriedades que podem ser atrativas, como baixo consumo de combustível com combustão mais limpa e boa eficiência (lembre-se que teoricamente é a mesma do ciclo Otto), baixa temperatura de operação e também baixo nível de ruído. Como mencionado acima, os motores Stirling estão presentes em diversas aplicações. Abaixo segue exemplos:

5.1 Bomba de Água

No início do artigo já foi dito que o principal uso do motor Stirling como substituto do motor a vapor era no acionamento de bombas d'água, por exemplo, em minas. Devido às melhorias, o motor Stirling é mais uma vez um elemento que pode ser útil para o acionamento de bombas e William Beale (1985) afirma que podem ser especialmente benéficos em áreas subdesenvolvidas já que sua construção não é difícil, podem ser feitas com materiais disponíveis na área e permite o uso de combustíveis sólidos disponíveis nessas áreas, como diferentes tipos de biomassa. Suas aplicações seriam voltadas para a obtenção de água não só para consumo, mas também para irrigação, etc. A Figura 8 mostra um motor Stirling de pistão livre com o qual é obtido o trabalho necessário para movimentar uma bomba de deslocamento positivo que é auxiliada por uma mola para realizar o movimento alternativo. Beale ressalta que esses tipos de configurações são muito simples.

Figura 8 - Motor Stirling usado para bombear água



Fonte: Beale, 1985

5.2 Produção de Eletricidade

Outro dos setores em que os motores Stirling estão presentes e podem ser desenvolvidos é o da produção de eletricidade.

Beale (1985) volta a apostar na utilização destes motores para a produção de eletricidade, sobretudo em zonas menos desenvolvidas pelo mesmo motivo, para poder utilizar combustíveis alternativos aos combustíveis fósseis. Para este propósito, um motor do tipo beta com acionamento por manivela é o mais simples, embora um motor de pistão livre possa ser mais eficiente (embora mais difícil de consertar).

Levando em conta que os motores Stirling podem trabalhar com qualquer fonte de calor, um sistema para aproveitar essa tecnologia seria na produção de eletricidade a partir da energia solar. Isso pode ser alcançado focando os raios de luz através de um prato parabólico. Kongtragool e Wongwises (2003) examinam como este método de obtenção de energia elétrica vem se desenvolvendo, bem como a situação atual e afirmam que esses sistemas são considerados os mais eficientes na conversão de energia solar em eletricidade. Na Espanha este tipo de instalações encontra-se na Plataforma Solar de Almería, onde existem vários protótipos que implementam esta tecnologia. Um projeto relevante com pratos parabólicos com motor Stirling foi realizado em 2010 pela empresa Stirling Energy Systems e Southern California Edison; o local escolhido foi o deserto de Mojave e foi instalada uma potência de 500 MW. A Figura 9 mostra uma imagem de uma das unidades instaladas pela empresa Stirling Energy Systems, na qual podem ser vistos tanto o prato parabólico quanto o motor (Graber, 2009).

Figura 9 - Fotografia de uma parabólica com motor stirling da empresa SES



Fonte: Graber, 2009

5.3 O Motor Stirling na impulsão de submarinos

Embora os motores Stirling nunca tenham sido usados em carros, eles são usados em submarinos. Isso significa que a energia necessária para a propulsão é realizada sem a introdução de um oxidante (o_2) da atmosfera (Thomton, 1994). Como Thomton apontou, a PIA está tentando diminuir a dependência de submarinos a diesel e ser capaz de estender o mergulho de algumas horas para semanas sem prejudicar a tripulação ou o barco. A utilização de reatores nucleares para propulsão de submarinos representou um grande salto nesse sentido, porém o motor Stirling também teve sua aplicação.

A empresa Kockums, que faz parte da Saab, instalou motores Stirling com sistema de oxigênio líquido no submarino francês Saga (SAAB) na década de 1980. Em 1988 eles fizeram seu primeiro trabalho com a Marinha Sueca, instalando um motor Stirling no submarino Näcken.

Toda a experiência acumulada e a experiência adquirida nos trabalhos levaram à instalação destes sistemas PIA em toda a classe Gotland de submarinos da Marinha Sueca, pelo que existem atualmente cinco deles. Devido ao seu bom desempenho, outros submarinos também foram convertidos para este sistema, o que estende a imersão de dias para semanas.

Figura 10 - Fotografia de um submarino classe Gotland da Marinha Sueca



Fonte: Google

5.4 Aplicação na Refrigeração

Walker (1973) destaca que um dos maiores sucessos do motor Stirling é sua aplicação na refrigeração. Ele explica que o sistema seria o inverso do que foi mencionado até agora, só que a fonte de calor neste caso não vem de uma caldeira na qual o combustível é queimado, mas sim que é o que se quer resfriar. Por sua vez, também se refere a um artigo que Köhler escreveu para a Scientific American em 1965 no qual é explicado o desenvolvimento dessa tecnologia. Neste artigo (Köhler, 1965) especifica que o uso do ciclo Stirling para refrigeração tem a melhor eficiência quando se trata de temperaturas muito baixas, ou seja, criogênicas. Esse seria um fator pelo qual essa tecnologia não foi desenvolvida antes, já que as aplicações não existiam muito antes. Esclarece ainda que o fato de o ciclo ser invertido implica que o que deve ser feito então é a introdução de energia mecânica para absorver o calor.

Já em 1945 Rinia e F.K. du Pré atingiu temperaturas de até -190°C (Köhler, 1965), mas após um maior desenvolvimento, do qual Köhler fez parte, temperaturas de -253°C foram alcançadas com boa eficiência. Por fim, o artigo aponta que o protótipo do refrigerador industrial que eles fabricaram atingiu temperaturas de -196°C com uma produção de 20 kW de frio (absorção de calor) com eficiência de 42%.

Por outro lado, uma das empresas líderes neste setor seria novamente a Philips (Stirling Cryogenics), que em 1946 já começava a otimizar as técnicas de refrigeração que utilizavam o ciclo Stirling. Embora o motor desenvolvido pela Philips não tenha tido grande sucesso comercial, como já foi dito, sua aplicação na criogenização teve. No início da década de 1990, a Philips Cryogenics Division tornou-se independente e continuou como Stirling Cryogenics BV, que ainda está em atividade hoje e fornece máquinas que podem reduzir temperaturas até -253°C .

6 Considerações Finais

O motor Stirling atualmente tem múltiplas aplicações. Como foi visto ao longo do artigo, o motor Stirling reapareceu em diferentes aplicações desde o início de sua “segunda etapa”, na qual a empresa Philips teria grande importância, pelo menos no início. Essas aplicações também são bastante variadas: da propulsão submarina à criogenização. Além disso, também houve tentativas de atingir outros setores como o automotivo, mas nunca foi comercializado.

As características do motor o tornam interessante na situação atual. As características gerais dos motores Stirling e seu ciclo, como visto na primeira parte do artigo, podem ser muito benéficas não só pelo desempenho teórico equivalente ao do ciclo Otto, mas também por serem realizados com combustão externa, que permite uma combustão mais limpa, além de poder utilizar qualquer fonte de calor, que inclui desde combustíveis não fósseis até o calor residual de processos industriais, incluindo a energia do sol.

Porém é evidente que mais pesquisas são necessárias para torná-lo competitivo. Embora, como já foi referido, o motor Stirling não possui capacidades suficientes ainda para o tornar plenamente competitivo com os motores de combustão interna (diesel e gasolina), que têm uma utilização muito ampla desde a sua invenção, o que leva a um grande desenvolvimento e melhorias, não sendo proeminente apenas no aspecto técnico, mas também econômico.

7 Referências Bibliográficas

- Beale, W. (1985). Entendendo os motores Stirling. PACT Pub.
- Graber, C. (30 de dezembro de 2009). Os motores são o futuro da energia solar? - Scientific American: <http://www.scientificamerican.com/article/are-engines-the-future-of-solar-power/>
- Kohler, J. (1965). O Ciclo de Refrigeração Stirling. Scientific American, 212(4), 119-127.
- Kolin, I., Koscak-Kolin, S., & Golub, M. (2000). Produção de eletricidade geotérmica por meio do Motor Stirling de Diferença de Baixa Temperatura. Anais do Congresso Geotérmico Mundial, (pp. 3199-3203). Kyushu-Tohoku. Download
- Kongtragool, B., & Wongwises, S. (2003). Uma revisão de motores Stirling movidos a energia solar e motores Stirling com diferencial de baixa temperatura. Revisões de energia renovável e sustentável(7), 131-154.
- Kongtragool, B., & Wongwises, S. (2007). Desempenho de motores Stirling diferenciais de baixa temperatura. Energia Renovável (32), 547-566.
- Martini, W. R. (1983). Stirling Engine Design Manual (Segunda ed.).
- PANELA. (4 de setembro de 2013). Sistemas de energia de radioisótopos: NASA. (P. Dyches, Editor) - NASA: <http://solarsystem.nasa.gov/rps/rtg.cfm>
- PANELA. (6 de novembro de 2014). Conversor Stirling Avançado. National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center: <https://tec.grc.nasa.gov/rps/advanced-stirling-converter/>
- SAAB. (s.f.). O motor Stirling. Um motor para o futuro. SAAB: <http://saab.com/naval/Submarines-and-Warships/technologies/The-Stirling-Engine/>
- Stirling Criogenia. (s.f.). O Ciclo de Stirling. A melhor maneira de gerar energia de refrigeração. Stirling Cryogenics: <http://www.stirlingcryogenics.com/~uploads/products//Datasheets/Stirling-cycle.pdf>
- Thombare, D., & Verma, S. (janeiro de 2008). Desenvolvimento tecnológico nos motores do ciclo Stirling. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(1), 1-38.

Thompson, G. B. (1994). Uma ferramenta de projeto para a avaliação da propulsão independente da atmosfera em submarinos.

Vineeth, C. (2012). Motores Stirling: um guia para iniciantes.

Walker, G. (agosto de 1973). O motor impressionante. *Scientific American*, 229(2), 80-87.

Wolverton, M. (março de 2008). Stirling no Espaço Profundo. *Scientific American*, 298(3), 22.