

ESTUDO SOBRE MOTORES STIRLING DE BAIXA TEMPERATURA COM ENERGIA SOLAR PARA BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Luiz Carlos Marques Junior¹

Faculdade de Tecnologia de Garça – Fatec
Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial

luizcarlosyas@gmail.com

Resumo – Este artigo analisa a teoria dos motores *Stirling*, sob a vertente de desenvolver um protótipo dessa tecnologia que atenda a demanda crescente por sistemas de irrigação de baixo custo, que se apropriem de fontes alternativas de energia. O objetivo dessa pesquisa é explorar e aplicar a tecnologia de motores *Stirling*, de baixa temperatura, com pistão líquido, usando a energia solar para o aquecimento dessa máquina possibilitando o bombeamento de água. Esse trabalho é relevante, pois contribui com a economia de energia elétrica e a preservação ambiental. A metodologia utilizada é o desenvolvimento experimental de um protótipo para testar a viabilidade da utilização do sistema proposto no bombeamento de água para uso doméstico e irrigação de pequenas unidades de agricultura familiar. Espera-se que através do protótipo se utilize diversas fontes de calor por se tratar de um motor de combustão externa de baixa temperatura, e que através deste trabalho interessados pelo tema possam desenvolver e aprimorar essa tecnologia.

Palavras-chave: Motor Stirling de baixa temperatura. Pistão líquido. Fontes Alternativas de Energia

Abstract- This article analyzes the theory of Stirling engines, under the aspect of developing a prototype of this technology that meets the growing demand for irrigation systems with low-cost, also appropriate of alternative energy sources. The objective of this research is to explore and apply the technology of low temperature Stirling engines with liquid piston, using solar energy for heating this machine, thus pumping water. This work is important because it contributes to energy saving and environmental preservation. The methodology used is the experimental development of a prototype to test the feasibility of using the proposed system in pumping water for domestic use and irrigation of small units of family farming. It is expected that the prototype will allow the use of different heating sources, once it is a low temperature external combustion engine, and that through this work interested people in the subject can develop and improve this technology.

Keywords: Low temperature Stirling engine. Liquid piston. Alternative energy sources.

¹ Aluno do Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial da Faculdade de Tecnologia de Garça-FATEC.

1. INTRODUÇÃO

Investimentos em ciência e tecnologia devem se constituir em desafios e prioridades na pauta das políticas públicas nacionais, para que a sociedade possa ter acesso a uma formação de qualidade, que oportunize a construção de projetos sociais, econômicos, culturais e ambientais, os quais venham provocar mudanças e transformações na sociedade e na realidade onde vive e atua.

O relatório do Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior (MDIC), apontou que de Janeiro a Agosto de 2014 50,4% da receita de exportação nacional veio de produtos básicos, em outras palavras commodities. Os principais produtos exportados são minério de ferro, soja, petróleo em bruto, milho e carnes.

Em contra partida a esses dados de acordo com o Censo Agropecuário (2006), realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a Secretaria de Agricultura Familiar, cerca de 70% dos alimentos produzidos no Brasil provem da agricultura familiar. Ainda segundo o Censo, a agricultura familiar é responsável por 84,4% das propriedades rurais e representa 35% do PIB brasileiro, sendo assim, uma atividade imprescindível para a economia nacional.

Dessa maneira apesar do Brasil, ser uma potência agrícola na produção de carnes, soja e milho, a maior parte dos alimentos consumidos pela população são provenientes da agricultura familiar.

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) (2015), no Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos, a demanda por água no mundo crescerá até 55% em 2050. Sendo que, a população mundial crescerá de 7,2 bilhões para 9,1 bilhões até 2050, e cerca de 6,3 bilhões viverão nas áreas urbanas. No mesmo relatório, estima-se que será necessário produzir mais 60% de alimentos até 2050, e que em países em desenvolvimento os números poderão chegar a 100%.

Nesse contexto, nasceu o tema escolhido para a pesquisa, cujo desafio se insere em desenvolver uma tecnologia que permita irrigar pequenas propriedades agrícolas ou até mesmo o bombeamento de água para uso doméstico, com um baixo custo e utilizando fontes alternativas de energia. Dessa maneira atenuando a demanda da água, causada principalmente

pelas atividades econômicas, como a indústria e a agricultura em grande escala, e a crescente urbanização.

A pesquisa realizada para o trabalho está ancorada teoricamente nos conteúdos desenvolvidos no curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, com foco nas áreas de sistemas térmicos e automação industrial, a qual se constituirá no Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). O objetivo é aplicar a tecnologia de motores *Stirling*, de baixa temperatura, com pistão líquido, usando a energia solar para o bombeamento de água para uso doméstico e irrigação.

ROSS (1981), URIELI e BERCHOWITZ, (1984) afirmam que em 1816, o engenheiro escocês *Robert Stirling* (1790 – 1878) criou um modelo de motor que utilizava um determinado volume de um gás qualquer, e quando aquecido externamente, era forçado a entrar numa câmara de volume maior que o inicial, onde o gás podia expandir-se livremente. Ele chamava o motor de “motor de ar” porque as máquinas a vapor de sua época explodiam com frequência.

As questões apresentadas, como a otimização dos recursos hídricos e o incentivo a agricultura familiar, refletem a relevância social e científica do tema. Para aprender os principais conceitos sobre os motores *Stirling* de baixa temperatura, e construir um protótipo de aplicação, foi efetuado revisão bibliográfica sobre o tema para obter aprofundamento teórico e verificar a viabilidade de utilização de um motor *Stirling* de Baixa temperatura na irrigação doméstica e de pequenas unidades de agricultura familiar.

A metodologia utilizada é o desenvolvimento experimental de um protótipo para testar a viabilidade do projeto proposto. A elaboração do protótipo possibilitará como resultado da pesquisa a elaboração de um roteiro construtivo do sistema proposto, permitindo seu desenvolvimento e aprimoramento pelos interessados no tema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os motores do tipo *Stirling* são máquinas térmicas cuja eficiência teórica é aproximadamente igual à máxima eficiência que uma máquina térmica pode atingir,

conhecida como eficiência do Ciclo de Carnot. Estes motores são movidos pela expansão de um gás quando aquecido, seguida da compressão do mesmo quando resfriado. Os motores *Stirling* contêm uma quantidade fixa de gás que se transfere de um lado a outro, entre uma extremidade fria e uma extremidade quente. O deslocamento do fluido de trabalho é realizado por um pistão móvel.

Para Reader e Hopper (1983, p. 3), “Uma máquina do ciclo *Stirling* cobre uma série de dispositivos como uma bomba de calor, uma maquina de refrigeração, um gerador a gás, etc”.

Esses motores podem ser classificados em dois tipos: Os cinéticos, que convertem energia térmica em movimento, usando um pistão conectado mecanicamente a um eixo. E os motores de pistão livre que usam uma bobina e dispositivos magnéticos para gerar energia elétrica. Para que se possa compreender melhor o funcionamento deste dispositivo é necessário também conhecer o ciclo em que o motor *Stirling* se embasa que é o Ciclo de Carnot (INFOESCOLA, 2013).

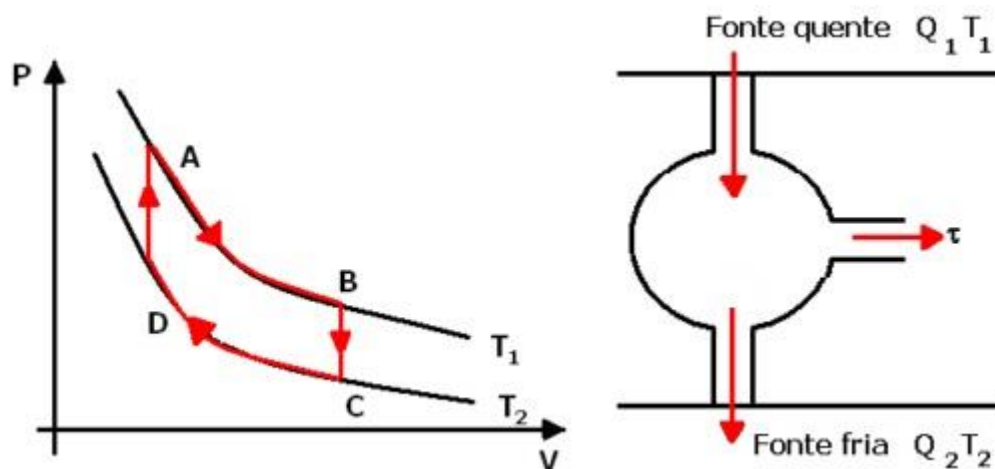
2.1 O Ciclo de Carnot

O cientista Nicolas Léonard Sadi Carnot em 1824 idealizou uma máquina térmica que proporcionaria um rendimento máximo. O Ciclo de Carnot consiste em duas transformações adiabáticas alternadas com duas transformações isotérmicas, sendo que todas elas seriam reversíveis (INFOESCOLA, 2013).

Para Walker (1973, p. 6), “Para qualquer situação dada à máxima eficiência térmica depende somente da temperatura e mínima do ciclo”. Essa relação é tão importante que é reconhecida como ‘Eficiência de Carnot’.

Deve-se conceber uma máquina térmica onde o gás sofra expansões e compressões segundo o Ciclo de Carnot e onde T_1 seja a fonte quente e T_2 a fonte fria, conforme figura 1.

Figura1-Modelo do Ciclo de Carnot



Fonte: Infoescola (2013).

Partindo do ponto A, o gás realiza uma expansão isotérmica AB, recebendo calor de Q_1 (Fonte quente). A seguir, ocorre a expansão adiabática BC, nessa expansão não há troca de calor. Através da compressão isotérmica CD obtem-se à temperatura T_2 da fonte fria, e nesta etapa o gás “rejeita” a quantidade Q_2 que não foi transformada em trabalho. A compressão adiabática DA se completa sem a troca de calor.

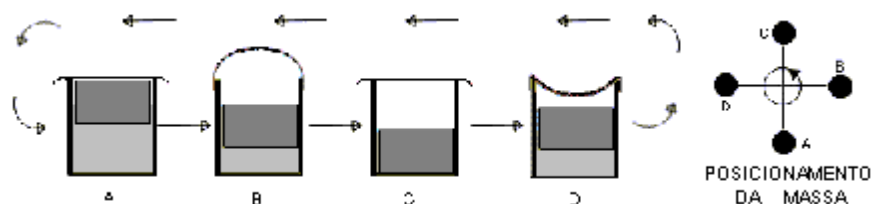
Através deste experimento é possível constatar que: $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$ assim como o rendimento pode ser descrito como $n = 1 - (Q_2/Q_1)$ (INFOESCOLA, 2013).

No Ciclo de Carnot, o rendimento é função exclusiva das temperaturas absolutas das fontes quentes e fria. $N = 1 - (T_2/T_1)$, este é o rendimento máximo de uma máquina térmica, em um sistema real não obtemos valores como $T_1 = 0$ e $|T_2| > |T_1|$, pode-se concluir que uma máquina térmica jamais terá rendimento de 1 ou seja transformar todo o calor fornecido em trabalho. Uma vez que se conhece o ciclo de Carnot o ciclo e o funcionamento de um motor *Stirling* será descrito a seguir

2.2 Ciclo e Funcionamento do Motor Stirling

Os processos termodinâmicos em que o gás atravessa no cilindro no ciclo de *Stirling* são apresentados no seguinte esquema, conforme figura 2.

Figura 2 – Ciclo Termodinâmico



Fonte: Infoescola. 2013.

O ciclo consiste de quatro processos internamente reversíveis – Processos nos quais o sistema e seus elementos possam retornar ao seu estado inicial depois de ter completado o ciclo – Os ciclos são divididos em dois isotérmicos e dois a volume constante. Os processos são descritos a seguir.

A > B: Expansão isotérmica a temperatura constante (temperatura da fonte quente de onde recebe calor).

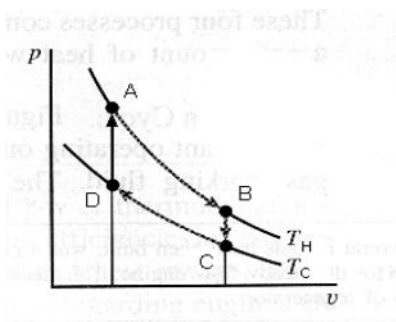
B > C: Resfriamento a volume constante

C > D: Compressão isotérmica a temperatura constante (temperatura da fonte fria, para onde perde calor)

D > A: Aquecimento a volume constante

O gráfico abaixo representa a relação entre a pressão, o volume específico e a temperatura do gás (CIÊNCIA.HSL, 2013).

Figura 3 – Diagrama Pv do Ciclo *Stirling*



Fonte: Ciência.hsw. 2013.

O propósito de um motor é converter a energia suprida como calor ou energia retida em combustível para trabalho. Uma máquina térmica recebe calor e produz trabalho enquanto executa um ciclo. Uma vez que o embasamento teórico necessário foi obtido à metodologia do protótipo será apresentada.

3. METODOLOGIA DO PROTÓTIPO

O artigo está pautado na pesquisa experimental, fundamentada na leitura e análise de pesquisas realizadas por pesquisadores da área de máquinas térmicas, com enfoque no motor *Stirling* e complementarmente na pesquisa de profissionais da área de mecânica, eletrônica digital e automação, dessa forma fornecendo o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento desse projeto.

3.1 Motor de Baixa Temperatura

Dentre os modelos de motores *Stirling*, o de baixa temperatura merece uma atenção especial. Em 1983, o professor Ivo Kolin da Universidade de Zagreb, na Croácia, apresentou o primeiro modelo de motor *Stirling* movido à baixa temperatura, o que foi um grande avanço tecnológico, modelo este que passou a funcionar abaixo dos 100 C°.

A teoria de motores *Stirling* também se aplica a este modelo, porém, por se tratar de um modelo singular, o motor de baixa temperatura possui características que o diferencia dos modelos anteriores como:

Baixa velocidade de operação, é uma característica intrínseca desta tecnologia, uma vez que o fluxo de transferência de calor é diretamente proporcional a diferença de temperatura da câmara quente para a câmara fria do motor. Tal característica permite que a máquina possua uma vida útil mais longa.

A pressão interna do motor também é menor quando se utiliza ar como fluido de trabalho, dessa maneira os motores de baixa temperatura tendem a ser maiores do que motores de combustão interna.

3.2 Tecnologia de Pistão Líquido

Na década de 1970, o Dr Colin West desenvolvia pesquisas para o departamento de energia nuclear do governo britânico. Naquele período ele desenvolveu um tipo de motor *Stirling* que utilizava pistões líquidos para funcionar.

A principal abordagem utilizada para sanar as limitações de transferência de calor no motor de *Stirling* é a utilização de gases de baixo peso molecular como hélio ou hidrogênio a altas temperaturas. No entanto a utilização de tais gases aumentam a complexidade e o custo da tecnologia, dessa forma fugindo do objetivo principal do projeto que é desenvolver essa tecnologia com baixo custo e complexidade para que possa ser replicada facilmente.

Como uma solução para as limitações na transferência de calor nas câmaras de trabalho e problemas de vedação de gases de baixo peso molecular a alta pressão, um sistema de pistão líquido é proposto. Um pistão líquido é uma coluna de líquido que entra e sai das câmaras de volume de trabalho fixas e permite a compressão direta ou a expansão do gás. O pistão líquido possibilita a conformidade com um volume de forma irregular, assim a câmara de trabalho pode ser concebida para maximizar a transferência de calor entre o gás e a geometria do interior, aumentando a área de superfície em relação ao volume, criando uma operação quase isotérmica. Portanto, o pistão líquido elimina preocupações de vedação e de fricção associadas com um vedante de pistão deslizante.

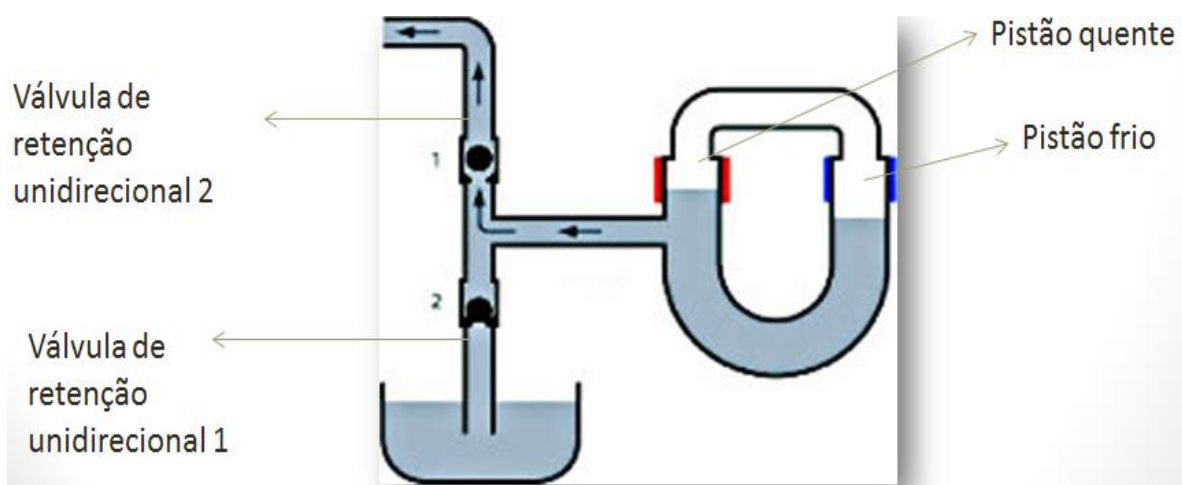
No protótipo o ar será utilizado como fluido de trabalho, e os pistões líquidos serão os principais componentes do sistema.

Além de funcionar como um aprimoramento para o motor *Stirling* de baixa temperatura, o pistão líquido em um ciclo *Stirling* pode ser usado como uma bomba d'água.

3.3 Bomba d'água de Pistões Líquidos (FLUIDYNE ENGINE)

O protótipo consiste em uma bomba d'água acoplada ao motor de pistões líquidos de baixa temperatura em um ciclo de *Stirling*. A bomba consiste em duas válvulas de retenção unidirecionais, a válvula inferior permite a passagem da água do reservatório para a câmara central da bomba e evita que a água retorne ao reservatório, a válvula superior da bomba permite a passagem da água da câmara central em direção à saída. Dessa maneira a água está sendo bombeada pelos pistões líquidos, realizando o ciclo de bombeamento de água. O líquido que se locomove nos tubos em direção à bomba funciona como um pistão de potência, de acordo com a figura 4, a figura 5 apresenta o protótipo desenvolvido.

Figura 4- Bomba d'água de Pistões Líquidos no Ciclo de *Stirling*



Fonte: Softwarelivre. 2015.

Figura 5- Protótipo de Bomba d'água de Pistões Líquidos



Fonte: Próprio autor. 2015

Um soprador térmico é utilizado para aquecer o protótipo, com temperaturas estimadas entre 90 °C e 95°C, os pistões líquidos consistem em uma mangueira transparente de diâmetro de 3/4”, enquanto que a câmara aonde há a troca de calor consiste em uma mangueira de gás de cozinha de 3/8” de diâmetro.

Esta tecnologia possui um ciclo de bombeamento sutil, portanto é preciso atentar-se no desenvolvimento das válvulas de retenção, sendo que estas precisam ser esféricas para evitar o retorno da água, no caso do protótipo foram utilizados rolamentos. O valor estimado dos componentes do protótipo da bomba não automatizada com sistema de seguimento solar é de pouco menos de R\$ 100. Os resultados obtidos são apresentados a seguir, juntamente com quais os próximos passos serão tomados em relação à pesquisa.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de motores Stirling na geração distribuída, ou seja, sem a conexão com a rede e isolado dos grandes centros, também vem sendo muito discutida, sendo mais uma possibilidade dada por esta tecnologia possibilitando acesso à eletricidade para a população que vive em comunidades isoladas. Em relação ao protótipo foi comprovada sua efetividade e baixo custo, uma vez que para desenvolver o protótipo da bomba apresentada gastou-se menos de R\$ 100. Dentre os resultados do protótipo encontram-se o funcionamento da bomba, quando aquecida a uma temperatura estimada entre 90 °C e 95°C, sua taxa de bombeamento é de 350 ml de água por minuto e 21 litros por hora. Entre os desafios destaca-se a fabricação das válvulas de retenção para a bomba, desafio este que após uma série de tentativas foi contornado.

O projeto proposto e que está sendo desenvolvido aparece como uma boa solução tanto como um sistema renovável e barato para o bombeamento de água, quanto um aprimoramento para o motor de baixa temperatura para a geração de energia elétrica. Agora que se obteve o embasamento teórico necessário e o primeiro protótipo foi desenvolvido com êxito, pretende-se automatizar esse projeto com um acompanhador solar, fazendo uso de uma lente Fresnel para focar a irradiação solar na bomba d’água, dessa maneira integrando elementos da mecânica, elétrica, eletrônica e programação que foram trabalhados no curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, ministrado na Faculdade de Tecnologia de Garça.

REFERÊNCIAS

CRESCE A DEPENDÊNCIA BRASILEIRA DAS COMMODITIES, MAS OS PREÇOS CAEM. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br>> Acesso em: 15 mar.2015.

CICLO DE CARNOT. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/fisica/ciclo-de-carnot>> Acesso em: 26 jun. 2013.

COMO FUNCIONAM OS MOTORES STIRLING. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/motores-stirling2.htm>> Acesso em: 12 maio. 2013.

FLUIDYNE. Disponível em: <<http://softwarelivre.org/tecnologias-sustentaveis/tec/fluidyne>> Acesso em: 15 mar. 2015.

MERENDA FRESQUINHA DIRETO DO CAMPO. Disponível em: <<http://www.sp.agenciasebrae.com.br>> Acesso em: 18 mar. 2015.

PUXADA PELOS BRICS, DEMANDA POR ÁGUA CRESCERÁ 55% ATÉ 2050, DIZ UNESCO. Disponível em:< <http://www1.folha.uol.com.br>> Acesso em: 15 mar. 2015.

URIELI, I.; BERCHOWITZ D. M. *Stirling Cycle Engine Analysis*. Local: Bristol. Ed: Adan Hilger Ltd, 1984.

WALKER, G;SENFT J.R. *Free Piston Stirling Engines*: lecture Notes in Engineering. Ed Springer-Verlag. Local Al, 1985.

WALKER, G. *Stirling-cycle machines*. Ed. Claredon. Local: Oxford, 1973.

READER, T. G; HOPPER, C. *Stirling Engines*. Local: Cambridge. Ed: E. & F. N. Spon, 1983