

MOTOR STIRLING DE BAIXA TEMPERATURA PARA BOMBEAMENTO D'ÁGUA COM SISTEMA DE SEGUIMENTO SOLAR AUTOMATIZADO

Luiz Carlos Marques Junior¹
Laerte Edson Nunes²

RESUMO

Este artigo analisa a teoria dos motores Stirling, sob a vertente de desenvolver um protótipo da tecnologia juntamente com um dispositivo de seguimento solar. A motivação da pesquisa se encontra em atender a demanda crescente por sistemas de irrigação de baixo custo, que apropriem-se de fontes alternativas de energia. Dentre os objetivos da pesquisa pode-se citar explorar e aplicar a tecnologia de motores Stirling de baixa temperatura com pistão líquido, usando a energia solar para o aquecimento dessa máquina através de um seguidor solar automatizado, possibilitando o bombeamento de água. Esse trabalho é relevante, pois aborda temas como a economia de energia elétrica, a preservação ambiental e o uso de fontes alternativas de energia. A metodologia divide-se no estado da arte da pesquisa e a metodologia do protótipo que é o desenvolvimento experimental da máquina 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 como fonte de energia para o mesmo, por se tratar de um motor de combustão externa de baixa temperatura, e que por meio deste trabalho interessados pelo tema possam desenvolver e aprimorar essa tecnologia.

PALAVRAS-CHAVE: Motor Stirling de baixa temperatura. Pistão líquido. Fontes Alternativas de Energia.

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. No caso do Brasil a agricultura familiar está diretamente ligada com essas metas.

O relatório do Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comercio Exterior (MDIC), apontou que de Janeiro a Agosto de 2014 50,4% da receita de

¹ Tecnólogo em Mecatrônica Industrial pela - FATEC/ GARÇA-SP. E-mail: luizcarlosyas@gmail.com

² Docente do curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial – FATEC/GARÇA-SP

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.

Nesse contexto de acordo com 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 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%.

Embasado nesse problema surgiu o tema escolhido para a pesquisa, cujo desafio se insere em desenvolver uma tecnologia que permita a irrigação de pequenas propriedades agrícolas, ou até mesmo o bombeamento de água para uso doméstico, com um baixo custo e utilizando fontes alternativas de energia. Assim, atenuando a demanda por água, causada principalmente pelas atividades econômicas, como a indústria, 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 por meio de um sistema de seguimento solar, permitindo 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.

Para apreender os principais conceitos sobre os motores *Stirling* de baixa temperatura e os sistemas de seguimento solar, no próximo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica como fundamentação teórica da metodologia de pesquisa.

A otimização dos recursos hídricos e o incentivo à agricultura familiar como principal produtora de alimentos e geradora de empregos no campo refletem a relevância social e científica do tema. Juntamente com estes fatos, objetiva-se por meio desta pesquisa agregar conhecimento teórico e prático tanto para a comunidade acadêmica quanto para interessados no tema.

Através do protótipo será possível gerar um roteiro construtivo do sistema proposto, permitindo o desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia por pessoas interessadas na mesma.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os motores *Stirling* são máquinas térmicas cuja eficiência teórica é semelhante à máxima que uma máquina térmica pode atingir, conhecida como eficiência do Ciclo de *Carnot*. Os motores em questão são movidos por um gás que quando aquecido se expande, e quando resfriado comprime. Os motores *Stirling* contêm uma quantidade fixa de gás transferido de uma extremidade a outra, os cilindros aonde ocorre essa transferência são denominados cilindro frio/quente. O deslocamento do fluido de trabalho é realizado por pistões móveis.

Para Reader e Hopper (1983, p. 3), “Uma máquina do ciclo *Stirling* cobre uma série de dispositivos como uma bomba de calor, uma máquina 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, o Ciclo de *Carnot* (INFOESCOLA, 2013).

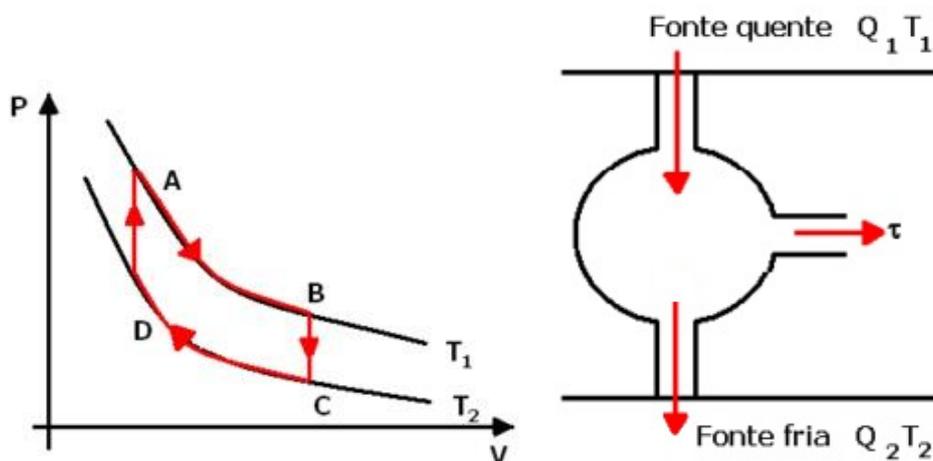
1.1. O ciclo de Carnot

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’.

Para a máquina de *Carnot* deve-se conceber uma máquina térmica em que 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.

Figura 1-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 obtém-se à temperatura T_2 da fonte fria, e nesta etapa o gás “rejeita” a quantidade Q_2 que não foi convertido em trabalho. A compressão adiabática DA se completa sem a troca de calor.

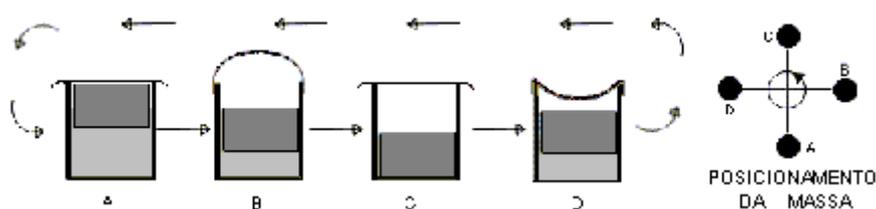
Por meio deste experimento é possível constatar que: $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$, assim como o rendimento pode ser descrito como $\eta = 1 - (Q_2/Q_1)$ (INFOESCOLA, 2013).

No Ciclo de *Carnot*, o rendimento é função exclusiva das temperaturas absolutas das fontes quente e fria. $\eta = 1 - (T_2/T_1)$, este é o rendimento máximo de uma máquina térmica. Em um sistema real não se obtém valores como $T_1 = 0$ e $|T_2| > |T_1|$, podendo-se concluir que uma máquina térmica jamais terá rendimento 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* serão descritos a seguir.

1.2. Ciclo e Funcionamento do Motor Stirling

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

Figura 2 – Ciclo Termodinâmico para o motor *Stirling*



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, conforme a descrição dos Os processos.

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.

No ciclo apresentado o motor converte a energia suprida, como calor em trabalho. Como se pretende utilizar a energia solar térmica como fonte de calor para o protótipo, é preciso conhecer os tipos de sistemas de concentração e seguimento solar, e qual destes sistemas será utilizado no protótipo.

1.3. Sistemas de Seguimento Solar

Um seguidor Solar é um dispositivo que orienta um objeto em direção ao Sol. O objeto que estará em movimento pode ser painéis fotovoltaicos, espelhos parabólicos, lentes *Fresnel* ou heliostatos.

Sistemas de seguimento solar fazem parte de um grupo de tecnologias denominadas, sistemas de concentração solar. Para Reif e Alhalabi (2014, p.1), estes são dispositivos ópticos que concentram a energia solar para a conversão em energia útil.

Tanto o sistema de concentração solar por espelhos parabólicos, quanto o de concentração solar por lentes *Fresnel* lineares possuem um concentrador. Assim consistem em um refletor que funciona com um único concentrador alinhado no eixo norte sul. O refletor é rotacionado para seguir o movimento do Sol, e a energia solar concentrada é refletida e captada por um receptor solar, que coleta a energia concentrada. Dependendo da aplicação, ambos os concentradores podem atingir a relação de concentração de 40:1.

Heliostatos são utilizados para concentrar calor em torres solares. A energia concentrada nos heliostatos é focada continuamente ao longo do dia em uma torre solar é por meio de tubos que são aquecidos o calor é conduzido para uma turbina a vapor, a turbina a vapor converte o vapor em energia elétrica. O calor concentrado na torre pode atingir um potencial de

concentração de 40:1, como os sistemas anteriores. Na figura 3 os principais sistemas de concentração são apresentados.

Figura 3 – Sistemas de seguimento solar de lente *Fresnel*, Heliostato e Concentrador Parabólico



Fontes: Ntkj.co (2015). Psu.edu (2015). Agp.ro (2015).

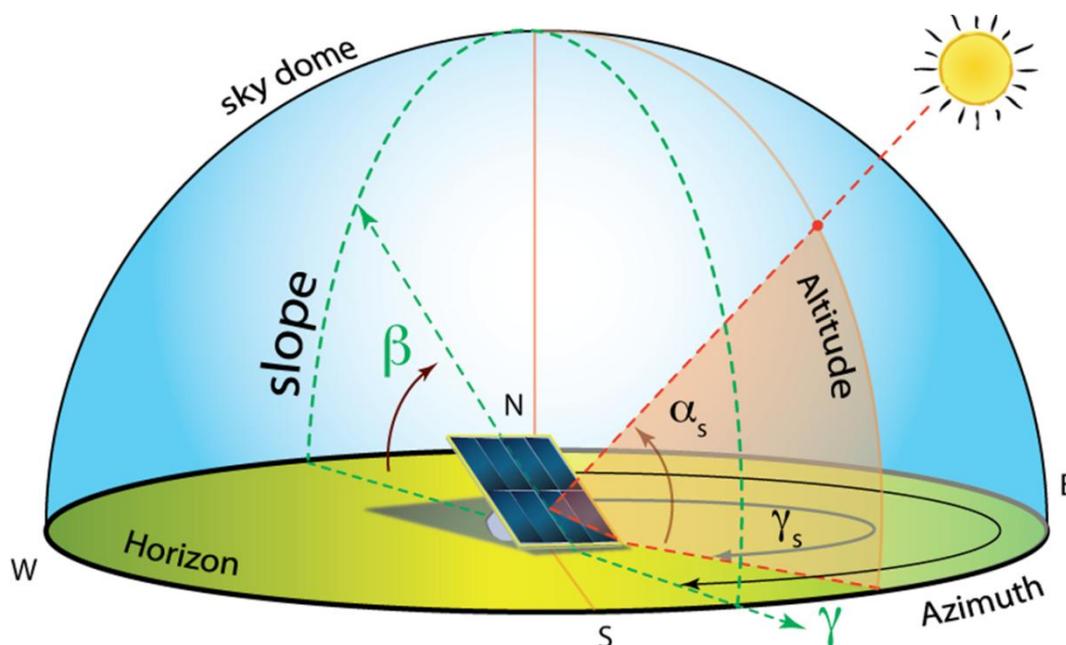
Ainda dentre os sistemas de concentração solar distinguem-se os de concentrador e os de concentrador passivo. Sistemas de concentração passivos não fazem usos de seguidores solar, portanto estão estáticos, como um painel de aquecimento de água doméstico, que por meio de tubos evacuados, implantandos no telhado de uma casa aquece e armazena calor. Os sistemas de concentração ativos são sistemas no qual há mais um ou mais dispositivos que seguem o movimento do Sol ao longo do dia para que possa obter maior eficiência na conversão da energia fotovoltaica para elétrica, térmica para elétrica ou térmica para mecânica. Existem diversos tipos de seguidores solar variando em custo, sofisticação e desempenho, porém, os dois modelos principais são os de um eixo de movimentação e os de dois eixos de movimentação.

Seguidores solar de um eixo podem se mover no sentido do ângulo de Altitude ou ângulo de Azimute. Sendo que o ângulo de Altitude é o ângulo perpendicular no sentido vertical da placa ou painel em relação ao Sol, e o ângulo de Azimute é o ângulo rotacional em relação à trajetória do Sol com na placa ou painel (movimento de leste a oeste).

Seguidores solar de dois eixos de movimentação podem se mover tanto no ângulo de Altitude quanto no ângulo de Azimute, assim permitindo o controle mais refinado e preciso do seguimento ao longo do dia.

Na figura 4, um sistema de seguimento solar de dois eixos, aplicado a painéis fotovoltaicos é apresentado, juntamente com a ilustração dos ângulos de Altitude e Azimute;

Figura 4 – Sistema de Seguimento Solar de dois eixos



Fonte: PennState (2015).

Após a pesquisa, para o protótipo será utilizado um sistema de seguimento solar de dois

2. METODOLOGIA DO PROTÓTIPO

O protótipo consiste em uma bomba d'água de pistões líquidos, funcionando no Ciclo de *Stirling* em baixa temperatura, com sistema de seguimento solar de dois eixos utilizando uma lente *Fresnel* linear para concentrar o calor no cilindro quente da bomba d'água. Para que se possa compreender melhor a integração dos componentes do protótipo, a teoria de funcionamento desses dispositivos é apresentada.

2.1. Motor de Baixa Temperatura

O protótipo está embasado no princípio de funcionamento de um motor *Stirling*, sob-baixa temperatura. 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 em sua época, modelo este que passou a funcionar abaixo dos 100° C.

A teoria de motores *Stirling* descrita anteriormente também se aplica a este modelo, porém 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. Com o aprofundamento da pesquisa, a tecnologia de pistão líquido surgiu como uma solução para os desafios estruturais do motor de baixa temperatura apresentados.

2.2. 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 maneira 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 e temperatura, 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.

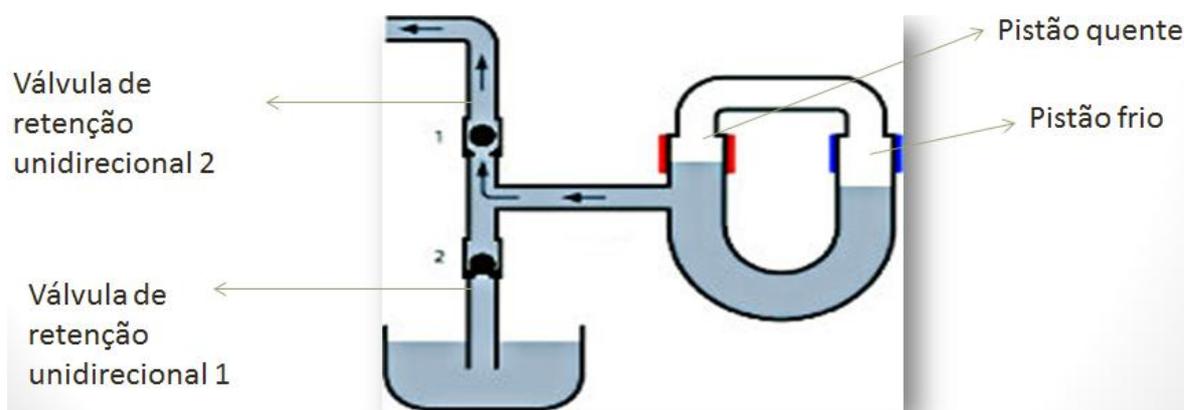
No protótipo o ar será utilizado como fluido de trabalho, e os pistões líquidos serão os principais componentes do sistema.

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.

2.3. 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 é composta de 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. O líquido que se locomove nos tubos em direção à bomba funciona como um pistão de potência, de acordo com as figuras 5 e 6.

Figura 5 - Bomba d'água de Pistões Líquidos no Ciclo de *Stirling*



Fonte: Softwarelivre (2015).

Figura 6- Protótipo de Bomba d'água de Pistões Líquidos



Fonte: O autor.

Um soprador térmico é utilizado para aquecer o protótipo, com temperaturas estimadas entre 100°C e 110°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 sútil, portanto é preciso atentar-se no desenvolvimento das válvulas de retenção, sendo que estas precisão 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.

Tanto o sistema de seguimento solar quanto a bomba d'água são apresentados na figura 7, sendo que mais informações a respeito do sistema de seguimento solar como algoritmo de controle e sistema de controle utilizado podem ser encontrados no artigo "SEGUIDOR SOLAR DE LENTE *FRESNEL* COM PLATAFORMA *OPEN SOURCE* DE CONTROLE", do mesmo autor. As considerações finais, dificuldades encontradas e resultados obtidos também são apresentados a seguir.

Figura 7 – Protótipo do sistema de seguimento solar



Fonte: O autor.

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.

Tanto a lente quanto a bomba d'água mostraram-se funcionais. Sendo que para a bomba d'água funcionar utilizou-se um soprador térmico. Testes para aquecer a bomba com lente *Fresnel* foram realizados, no entanto o calor fornecido pela luz focada pela lente não foi o suficiente para aquecer a bomba. O ponto focal da lente teve cerca de 1 cm de diâmetro, como o tubo de cobre possui 15 cm de comprimento e 2,54 cm de diâmetro a lente foi capaz de aquecer o tubo, mas a temperatura necessária para o funcionamento da bomba não foi atingida.

Dentre os resultados do protótipo encontram-se o funcionamento da bomba, quando aquecida com o soprador a uma temperatura estimada entre 100 °C e 110°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.

A pesquisa, juntamente com o protótipo desenvolvido aparecem como uma promissora solução tanto para a demanda de um sistema renovável e barato para o bombeamento de água, quanto como um roteiro para que interessados no tema possam dar continuidade ao projeto ou adapta-lo de acordo com sua realidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANIRUDH NAMBIAR'S DESIGN BLOG. **eSolar's Heliostat Fields: A paradigm shift in Concentrated Solar Power (CSP)**. Disponível em: <<https://sites.psu.edu/anirudhnambiar/2013/09/30/esolars-heliostat-fields-a-paradigm-shift-in-concentrated-solar-power-csp/>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

Cervo, L. A; Bervian, P. A. **Metodologia Científica**. São Paulo: Pearson Education, 2004.

CIENCIA.HSW. **Como Funcionam os Motores Stirling**. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/motores-stirling2.htm>>. Acesso em: 12 maio. 2013.

FOLHA DE SÃO PAULO. 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.

GREEN POWER. **Energia Solara.** Disponível em: <http://www.agp.ro/ro/energia_solara/>. Acesso em: 10 ago. 2015.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. **Censo Agropecuário** 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/2006/>>. Acesso em: 30 jun. 2013.

INFOESCOLA. **Ciclo de Carnot.** Disponível em: <<http://www.infoescola.com/fisica/ciclo-de-carnot>> Acesso em: 26 jun. 2013.

Kansal, R. **PIC Based Automatic Solar Radiation Tracker** . Disponível em: <http://files.spogel.com/abstracts/p-0456--automatic_solar_rad_tracker.Pdf> Acesso em: 08 ago. 2015.

SEBRAE. **Merenda Fresquinha Direto do Campo.** Disponível em: <<http://www.sp.agenciasebrae.com.br>> Acesso em: 18 mar. 2015.

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

MDIC, Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comercio Exterior. **Relatórios** Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=1&menu=591>> Acesso em: 18 set. 2015.

NIHON TOKUSHU KOGAKU JUSHI. **Fresnel lens for solar concentrator.** Disponível em: <http://www.ntkj.co.jp/product_fresnel_solar_en.html>. Acesso em: 10 ago. 2015.

O ESTADO DE SÃO PAULO. **Cresce a Dependência Brasileira das Commodities, mas os preços caem.** Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br>>. Acesso em: 15 mar. 2015.

PENN STATE. **COLLECTOR ORIENTATION.** Disponível em: <<https://www.education.psu.edu/eme810/node/576>>. Acesso em: 08 ago. 2014.

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

Reif, H. J; Alhalabi, W. Design and Analysis of a High-Efficiency, Cost-Effective Solar Concentrator. Disponível em: <<https://users.cs.duke.edu/~reif/paper/solar/SolarConcentrator/SolarConcentrator.pdf>> Acesso em: 08 ago. 2015.

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

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

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