

ESTUDO DA VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA TERMOSSOLAR UTILIZANDO PRATOS PARABÓLICOS E MOTOR STIRLING (DISH/STIRLING)

AMANDHA DE KASSIA DO VALE CARVALHO¹, ROGER BARROS DA CRUZ²,

¹Graduanda em engenharia mecânica, Faculdade Estácio de Belém, Belém-PA, amandha.kvc@gmail.com;

²M. em engenharia mecânica, Prof. Aux., Faculdade Estácio de Belém, Belém-PA, roger.cruz@live.estacio.br;

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
Palmas/TO – Brasil
17 a 19 de setembro de 2019

RESUMO: Com a finalidade de produzir energia elétrica limpa e sustentável na Amazônia, este artigo fez o estudo de possibilidade de implementação de um sistema de geração termossolar, utilizando um coletor do tipo disco parabólico para gerar energia térmica ao funcionamento de um motor Stirling. Para tal, foram consideradas as condições climáticas e meteorológicas da cidade de Belém para efetuar o cálculo da Irradiação Normal Direta (DNI) e, a partir disso, dimensionar o coletor, fazer o balanço de energia e analisar o rendimento no motor. Os dados obtidos levaram à conclusão de que pode ser possível implementar um sistema desse tipo na cidade de Belém, desde que o DNI seja mensurado de forma experimental, com o auxílio de equipamentos de medição meteorológicos adequados para a obtenção de um resultado preciso.

PALAVRAS-CHAVE: Energia termossolar; Motor Stirling; Dimensionamento Geométrico, Balanço de Energia; Coletor Solar

STUDY OF THE FEASIBILITY OF IMPLEMENTATION OF A SYSTEM OF ENERGY GENERATION THERMSOLAR USING PARABOLIC DISHES AND STIRLING ENGINE

ABSTRACT: With the purpose of producing clean and sustainable electricity in the Amazon region, this article made the study of the possibility of implementing a thermosolar system, using a parabolic disk collector to generate thermal energy for the operation of a Stirling engine. For that, the climatic and meteorological conditions of the city of Belém were considered to calculate the Direct Normal Irradiation (DNI) and, from this, to size the collector, to balance energy and analyze the performance in the engine. The data obtained led to the conclusion that it may be possible to implement such a system in the city of Belém, provided that the DNI is measured experimentally with the aid of meteorological measurement equipment suitable for obtaining an accurate result.

INTRODUÇÃO

Após a queda do petróleo na década de 70, a comunidade científica passou a voltar os olhos para técnicas renováveis de geração de energia elétrica (YERGIN e HOBBS, 2005). Dentre elas, a transformação de trabalho gerado por energia mecânica por meio do uso de turbinas hidráulicas e cata ventos, ou a transformação direta da energia solar através de células fotovoltaicas ou geração de energia térmica por concentradores solares. A energia termossolar, contudo, já vem sendo estudada desde os tempos antigos, com protótipos muito bem desenvolvidos e concentradores capazes de atingir temperaturas de até 1750 °C. (KALOGIROU, 2009)

O Brasil possui singular capacidade de produzir energias renováveis, em especial, a solar, pois tem maior parte do território nacional com índices de radiação solar elevados, e com região situada em posição vertical a esses raios, sendo norte e nordeste privilegiados com essa incidência ao longo de todo o ano. É ainda, contudo, uma das energias renováveis mais caras, fato que dificulta a dispersão da tecnologia. (TOMALSQUIM, 2016)

Um sistema termossolar utiliza energia térmica gerada pela radiação solar para aquecer um fluido e gerar trabalho, transformando a energia mecânica em energia elétrica. Há várias geometrias de concentradores solar. Neste trabalho, será analisada a geometria de disco parabólico, pois, para o uso de motor Stirling, possui eficiência para geração de eletricidade de 28%, perdendo para 15% quando utilizado o ciclo Rankine. A Fig (1) mostra um exemplo de projeto já implementado no globo. (REIS, 2011)

Entre as tecnologias termossolares, a composição disco parabólico e um motor Stirling, também chamados de sistemas Dish/Stirling, alcançam a maior eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica (valores máximos próximos 29% e 30%), para potência instalada entre 1 e 25 kWe. (ANDRAKA, *et al.*, 1990)

MATERIAL E MÉTODOS

Para a execução dos objetivos do estudo, foi necessário fazer o levantamento bibliográfico de acordo com as tecnologias atuais, além da definição de equações pertinentes para efetuar os cálculos das variáveis em questão. Para a validação dos cálculos, foi feita uma rotina de programação em Python. Houve a necessidade da utilização do Método Numérico da Bisseção para calcular uma equação implícita, a qual resulta no ângulo de borda do coletor.

De acordo com Montes P (2008), a radiação espectral é a intensidade de radiação recebida em cada comprimento de onda. A unidade de medida é W/m². Há uma constante, chamada constante solar, que é a quantidade de energia recebida na forma de radiação solar por unidade de tempo e unidade de área, medido pela parte exterior da atmosfera, num plano ortogonal aos raios solares. Ao nível do solo, contudo, a radiação é enfraquecida ao sofrer processos físicos de espalhamento e absorção, bem como por outros componentes como irradiação solar refletida e irradiação difusa, efeitos causados pelas nuvens e partículas em suspensão. A constante solar é definida por $I_{cs} = 1367$ [W/m²]. (GÓMEZ, 2011).

A radiação direta normal é um parâmetro imprescindível para o estudo. É aquela que incide sempre perpendicularmente a uma superfície. Ela provém diretamente do disco solar, e não sofreu mudança de direção a não ser a causada pela refração atmosférica. Porfirio, (2012) aponta um modelo de estimativa de irradiância direta normal sob céu claro, chamado de PC12, que é abreviação de Porfirio e Ceballos, 2012.

Os coletores parabólicos, que permitem um melhor aproveitamento da energia solar que os sistemas não concentradores, atingem temperaturas entre 650 e 780°C. Isso acontece porque os espelhos coletores refletem a radiação solar para um receptor localizado na cavidade focal da parábola, gerando energia térmica que, com o auxílio do motor Stirling, será transformado em energia mecânica (CASTELLANOS, 2012). O melhor desempenho é explicado pela segunda lei da termodinâmica, que diz que a eficiência da máquina térmica é tão elevada quanto maior for a temperatura de funcionamento. (SHAPIRO *et al.*, 2011). O coletor é composto por espelhos refletores e um foco concentrador com material absorvedor. Para o dimensionamento geométrico do coletor, utilizou-se a metodologia de Castellanos (2012).

O motor Stirling consiste em uma máquina térmica que realiza trabalho a partir da contração e da expansão de um gás, que alterna sob um gradiente térmico. É considerado um motor de combustão externa, mas o calor fornecido ao motor não necessariamente é proveniente de uma combustão. O fluxo térmico é controlado por mudanças volumétricas. Teoricamente, este motor obedece um ciclo termodinâmico reversível. O motor utiliza uma fonte de calor como gases, biodiesel, entre outras fontes. Neste trabalho, será utilizado a radiação solar como fonte de calor. (WALKER, 1980)

A tabela (1) lista as principais equações utilizadas no estudo.

Tabela 1 Principais Equações Utilizadas

Principais Equações Utilizadas	
Irradiância Normal Direta (DNI)	$\phi_{\lambda} = S_{\lambda} T_{R\lambda} T_{o\lambda} T_{a\lambda} T_{g\lambda}$ (Eq. 1)
Energia solar incidente sobre a abertura do coletor	$Q_s = \phi_{\lambda} * A_{abertura}$ (Eq. 2)

Energia Útil	$Q_{\text{útil}} = Q_s - Q_{\text{perdas}}$ (Eq. 3)
Diâmetro do Coletor	$d = 2 \sqrt{\frac{P_{el}}{\pi \cdot \eta_{\text{sys}} \cdot \phi_{\lambda}}}$ (Eq. 4)
Área de Abertura do Coletor	$A_{ap} = \frac{P_{el}}{\eta_{\text{sys}} \cdot \phi_{\lambda}}$ (Eq. 5)
Altura da Parabólica	$h = a \left(\frac{Dp}{2} \right)^2$ (Eq. 6)
Curvatura da Parábola	$a = \frac{1}{4f}$ (Eq. 7)
Distância Focal	$f = \frac{Dp}{4 \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)}$ (Eq. 8)
Ângulo de Borda	$\phi_r = \tan^{-1} \left(\frac{8f/Dp}{(16(f/Dp)^2 - 1)} \right)$ (Eq. 9)
Raio do Receptor	$r_r = \frac{2f}{1 + \cos \phi_r}$ (Eq. 10)
Eficiência em Condições de Máxima Potência	$\eta_{\text{max, potência}} = \eta_c \eta_{\text{curzon-ahlbora}}$ (Eq. 11)
Eficiência do Motor	$\eta_{IT} = k_s \left(1 - \frac{T_c}{T_{rec}} \right)$ (Eq. 12)

Fonte: autora, 2019

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Encontrou-se, a partir dos cálculos de transmitância, um valor de DNI que deu início ao dimensionamento geométrico. Para o ângulo de borda, encontrou-se uma equação implícita, que foi resolvida através do Método da Bissecção. Todos os cálculos foram efetuados utilizando-se rotinas de programação em Python. Obteve-se, então, os valores exibidos na Tab. (2).

Tabela 2 Dimensionamento Geométrico

Dimensionamento Geométrico	
DNI	312,0765 W/m ²
Diâmetro do Coletor	12,776 m
Diâmetro do Receptor	7,507 m
Área Coletor	128.205 m ²
Ângulo de Borda	45°
Distância Focal	5,725
Curvatura da Parábola	0,0437 1/m
Altura da Parabólica	1,782 m
Distância de Projeto do Receptor	2,317 m
Altura do Projeto do Receptor	3,408 m

Fonte: autora, 2019

Levando em consideração os valores já apresentados de radiação local e já definidas área e diâmetro do coletor através das Eq. (4) e (5), foi possível calcular a razão de concentração, a razão de concentração geométrica, a eficiência instantânea do coletor, as perdas por convecção e as perdas por radiação. Os valores obtidos podem ser visualizados na Tab. (3).

Tabela 3 Balanço de Energia no Receptor

Balanço de Energia	
Razão de Concentração	3.0464
Razão de Concentração Geométrica	536.229
Perdas por Radiação	20436.902 J/s
Perdas por Convecção	37300.844 J/s
Energia útil	64057.00399 J/s
Eficiência instantânea do Coletor	0.53

Fonte: autora, 2019

Com o auxílio da metodologia Curzon-ahlborn, foi possível encontrar o valor de eficiência de 0.27, para condições de máxima potência. Foi encontrado, para isso, uma eficiência do concentrador η_c igual a 0.62 e uma eficiência de Curzon-ahlbora $\eta_{Curzon-Ahlbora}$ de 0.43. A eficiência do motor η_{IT} foi de 0.26.

Para fazer uma plausível avaliação da viabilidade de implementação do projeto, fez-se a comparação com os valores encontrados por projetos já estabelecidos no globo e que obtiveram êxito. Para o presente trabalho, considerou-se uma potência de 10KW e calculou-se, segundo os dados de DNI encontrados, que seria necessário um diâmetro de 12,776 m. Esse é um valor de diâmetro elevado, se comparado aos modelos estudados. A eficiência em condições de potência máxima de 0,27 indicou, contudo, um bom aproveitamento da energia disponível.

Crê-se, ainda, que o valor de DNI encontrados através do método teórico exposto pela Eq. (1) não tenha sido fiel aos valores reais, pois o método permite apenas uma vaga aproximação que não é suficientemente confiável para níveis de implementação de projeto.

Foi feita a estimativa de custos de implementação, levando em consideração os materiais de coletor e receptor por área, o valor do motor Stirling e os custos com mão de obra necessária para três meses. Foram considerados os valores para apenas um sistema disco parabólico mais motor, e não foram considerados os valores agregados a estrutura metálica de sustentação do projeto, nem insumos como água, energia necessária para implementação ou transporte de materiais. A tabela (4) indica os dados encontrados a partir da estimativa de custos.

Tabela 4 Estimativa de Custos de Implementação

Custos de Implementação	
Espelho Refletor (Prata)	R\$9.574,35
Motor Stirling	R\$32.747,72
Receptor (Cromo Negro)	R\$10.681,94
Mão de Obra	R\$142.500,00
Total	R\$195.504,01

Fonte: autora, 2019

CONCLUSÃO

Em consequência do estudo feito a respeito do dimensionamento do coletor solar, com as características meteorológicas pertinentes e os dados de eficiência encontrados, foi possível o entendimento da forma como um sistema de geração de energia termossolar funciona, bem como alguns métodos existentes para o seu projeto.

Foi possível chegar a um resultado teórico do valor de Irradiação Direta Normal, variável meteorológica imprescindível para os cálculos das dimensões geométricas dos componentes do projeto. Encontrou-se, a partir disso, os dados de dimensionamento geométrico do projeto e, ainda, foi feito o balanço de energia no receptor. Feitos esses cálculos, achou-se as eficiências do motor e do sistema em condições de máxima potência.

Os resultados obtidos levaram ao entendimento de que a implementação do projeto pode ser viável, desde que haja a correta aferição experimental do valor de DNI, além do desenvolvimento de simulações computacionais para a precisa indicação de temperaturas do motor.

Além disso, foi possível perceber que a tecnologia termossolar com o uso de pratos parabólicos e motor stirling é ainda muito cara em comparação à outras fontes de energias renováveis. É, contudo, uma boa concorrente para a energia fotovoltaica, que ainda tem um preço de implantação superior ao da termossolar.

Deve-se considerar, também, o fato de a energia termossolar ser ecologicamente superior às demais fontes de produção energética, pois possui baixos índices de produção e emissão de poluentes para a atmosfera e, sendo assim, exige menor gasto com segurança ambiental. Existe, ainda, a vantagem de não utilizar água para a produção direta de eletricidade, com exceção daquela usada em ações operacionais e limpeza. Esses fatos concedem à tecnologia uma vantagem técnico-operacional em comparação com as demais.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil) (ANEEL). Resoluções homologatórias – Biblioteca virtual.
- Alahmad, Adil; Farsakoglu, Omer Faruk. Comprehensive Design of Stirling Engine Based Solar Dish Power Plant with Solar Tracking System. *Journal Of Eltrical And Eletronic System*. Turquia, p. 1-2. jan. 2018
- Andraka, C., Moreno, J., Diver, R., Ginn, W., Dudley, V., & Rawlinson, K. (June de 1990). Reflux Pool-boiler As A Eieat-transport Device For Stirling Engines: On-sun Test Program Results. vol 5, pp. 274 - 280.
- Anjos, Vitor Luiz Rigote dos. *Análise Experimental dos Processos de Transferência de Calor Aplicados à Concentração Solar*. 2008. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.
- Bancha, K., & Somchai, W. (25 de February de 2005). Optimum absorber temperature of a once-reflecting full conical concentrator of a low temperature differential Stirling engine. *Renewable Energy*. vol 30, pp. 1671–1687.
- Batista, R. L. (2007). Geração de energia elétrica com coletor solar e motor stirling. Universidade de São Paulo escola Politécnica, Engenharia Mecânica, São Paulo, 1-95 p.
- Castellanos, Eng. Luis Sebastian Mendoza. *Modelagem de sistemas de geração deeletricidade a partir de energia solar utilizando pratos parabólicos e motores stirling (dish/stirling)*. 2012. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.
- Gómez, C. A. (2011). *Diseño del campo de heliostatos para torres solares de receptor central*. Especialidad Tecnologías Energéticas, Universidad Carlos III De Madrid Escuela Politécnica Superior , Ingeniería Térmica y Fluidos, Madrid, 1-138 p.
- Kalogirou, S. A., 2009. *Solar energy engineering: processes and systems*. 1ª edição, Academic Press, Elsevier, EUA.
- Madeira, Rafael Alves. *Custos Associados à Energia Termossolar de Receptor Central*. Rio de Janeiro, RJ – Brasil, 2008. 99páginas. Monografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Negri, Jean Cesare et al. “Opções tecnológicas para a geração distribuída até 30MW” in *Revista Eletricidade Moderna*, São Paulo: Aranda Editora, ano XXXII, número 356, p. 184, novembro 2003.
- Porfirio, Anthony Carlos Silva. **Estimativa de Irradiação Solar Direta Normal Mediante Satélite: Um Estudo para o Nordeste Brasileiro**. 2012. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meteorologia, Inpe, São José dos Campos, 2012.
- Reis, Lineu Belico dos. *Sistemas Solares para Geração de Eletricidade*. In: REIS, Lineu Belico dos. *Geração de Energia Elétrica*. 2. ed. Barueri: Manole Ltda, 2011. p. 211-239.
- Rocha, Ribeiro, 2017. *Instrumentos meteorológicos e métodos de observação*. USP, Departamento de Ciências Atmosféricas
- Shapiro, H.N. And Moran, M. J. 2011. *Princípios de Termodinâmica para Engenheiros*. Grupo GEN/LTC.
- Tomalsquim, Maurício T.. *Eergia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016. 451 p
- Walker, G. *Stirling engines*. Nova Iorque: Oxford University Press, 1980. (Oxford science publications). Citado 7 vezes nas páginas 25, 29, 31, 36, 39, 40 e 46.
- Yergin, D.; Hobbs, D., 2005. In *Search of Reasonable Certainty – Oil and Gás Reserves Disclosure*. CERA.