

## **ANÁLISE DE VIABILIDADE NA GERAÇÃO DE ENERGIA HELIOTÉRMICA SOLAR DISH STIRLING COM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA A HIDROGÊNIO**

Eduardo Libório Piedade da Silva Santos (UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA)

eduardoliborio@outlook.com

Robson da Silva Magalhães (UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL DA BAHIA)

robsonmagalhaes@ufba.br

### **Resumo**

A emissão exacerbada de gases estufa, como o CO<sub>2</sub>, já atinge níveis preocupantes, e um dos seus principais responsáveis é a geração de energia elétrica através da queima de combustíveis fósseis. A fim de reduzir tais índices, vem crescendo a importância do uso de meios alternativos de geração de energia elétrica, como os geradores com fonte solar. Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma revisão bibliográfica dos estudos relacionados ao gerador de energia solar heliotérmica do tipo solar Dish Stirling (DS), considerando os principais componentes da sua Unidade de Conversão de Potência (UCP), associada a um sistema auxiliar de armazenamento de energia a hidrogênio. Essa revisão bibliográfica intenciona embasar futuros estudos sobre o tema, e evidenciar o estado da arte no processo de geração heliotérmica com um sistema DS, e seus respectivos componentes. A pesquisa se estende aos métodos de armazenamento de energia, com o foco no armazenamento a hidrogênio, seguida de uma análise e avaliação das publicações nesses temas. Deste modo, obteve-se uma base de dados adequada para futuros estudos nessa área. Assim, é esperado se demonstrar a viabilidade da geração de energia elétrica através do método solar heliotérmico do tipo solar DS, e o seu potencial competitivo, frente aos demais métodos amplamente empregados na atualidade.

**Palavras-Chaves:** energia solar, solar dish, motor Stirling, armazenamento de energia.

### **1. Introdução**

Em decorrência da emergente preocupação com as consequências do aquecimento global, fenômeno resultante principalmente da emissão excessiva de gases poluentes, é notório o crescimento acentuado do investimento em métodos alternativos para a geração de energia

elétrica, especialmente os métodos renováveis e não poluentes. Segundo dados da REN21 (2016), estima-se que 19,2% da matriz energética mundial já corresponde a produção de energia por métodos renováveis.

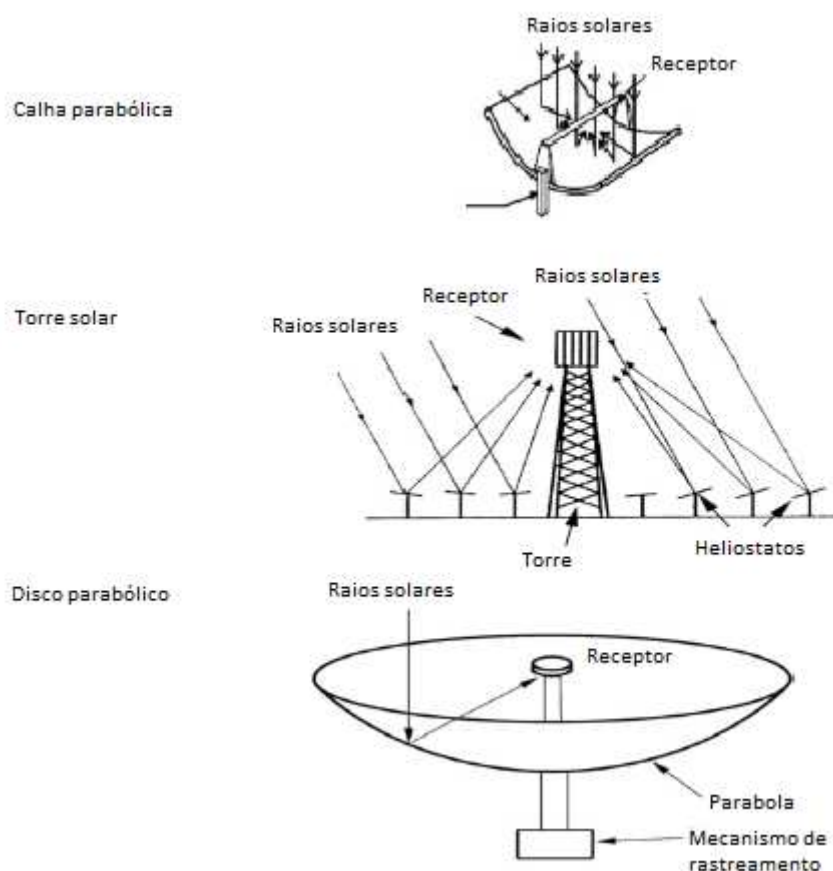
Uma das principais fontes para a produção de energia elétrica limpa é o sol. Atualmente 1,2% da produção mundial de energia elétrica é solar (REN21, 2016). O aumento da popularidade dessa fonte pode ser atribuído a sua ampla e indiscriminada disponibilidade, além da versatilidade dos sistemas geradores, permitindo tanto uma produção em pequena escala *off grid* (desconectados da rede de distribuição) ou *on grid* (conectados à rede de distribuição), como em usinas destinadas a produção em larga escala. Os principais modos de geração de energia elétrica solar são: a geração fotovoltaica, que utiliza células solares feitas de materiais semicondutores para a geração de eletricidade através do efeito fotoelétrico; e a heliotérmica, que, como explicam Barlev, Vidu e Stroeve (2011), se baseia na utilização de espelhos para redirecionar, focar e coletar a luz solar em forma de calor. O calor é absorvido por um fluido de transferência térmica, e pode ser usado para alimentar turbinas ou motores para gerar energia elétrica.

No International Energy Agency's Technology Roadmap for Solar Thermal Electricity estima-se que as plantas heliotérmicas proverão 11% da geração de eletricidade até o ano de 2050 (4400 TWh), com 1000 GW de capacidade instalada em todo mundo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2014 apud NAVARRO et al. 2016). Em 2015, pôde-se observar um crescimento de 9,7% na geração heliotérmica. Um valor ainda modesto quando comparado aos 28% de crescimento na geração com uso da tecnologia fotovoltaica, e aos 17% de crescimento na geração com o uso da tecnologia eólica (REN21, 2016). De uma forma geral, o progresso realizado na produção de energia com tecnologia heliotérmica, especialmente na última década, está voltado para a melhoria da eficiência na produção energética solar-elétrica, tornando-a, em um futuro próximo, economicamente viável, quando comparada com a energia produzida pela queima de combustíveis fósseis (BARLEV; VIDU; STROEVE, 2011).

Os principais tipos de gerador heliotérmico são: o de calha parabólica (*parabolic trough*), o de torre solar (*solar tower*), e o de disco parabólico (*solar dish*) (Figura 1). O gerador do tipo calha parabólica consiste num conjunto de segmentos reflexivos posicionados em série, formando longas calhas com uma linha focal, ao longo da qual um receptor, longo tubo de metal revestido de vidro, é montado, e através de onde um fluido de transferência de calor absorve o calor, e o transporta para a turbina, pela qual se gera eletricidade. O sistema de torre central consiste em um campo com um grande arranjo de heliostatos, espelhos planos individualmente orientados

para refletir a luz solar para um ponto, distribuídos ao redor de uma torre onde é montado o receptor, no qual um fluido circula em um circuito fechado, absorvendo o calor refletido e o direcionado para a produção de energia em uma turbina a vapor. Os coletores do tipo disco parabólico utilizam um concentrador em forma de disco parabólico e um sistema de rastreamento solar que mantem a convergência luminosa sempre no seu ponto focal, onde um receptor aquece um motor térmico, que absorve o calor, e o transforma em energia mecânica, acionando um alternador que gera energia elétrica (BARLEV; VIDU; STROEVE, 2011).

Figura 1 - Principais tipos de gerador heliotérmico



Fonte: Adaptado de Kalougirou (2004)

O sistema de disco parabólico, com referido por Kalougirou (2004), apresenta as seguintes vantagens em relação às outras tecnologias heliotérmicas: alta eficiência; maior taxa de concentração, o que aumenta a sua eficiência na absorção da energia térmica e na conversão de potência; e o formato modular, permitindo o uso de unidades independentes ou como uma parte de um grande sistema de discos parabólicos. O sistema disco parabólico se mostra uma opção interessante para a geração complementar de energia. Contudo, o maior desafio na aplicação desses sistemas é o desenvolvimento de uma unidade de conversão de potência de baixo custo

de produção e manutenção, que apresente uma longa vida útil, uma alta taxa de conversão e a habilidade de operar automaticamente (KALOGIROU, 2004).

Neste trabalho serão apresentados alguns estudos relevantes sobre os principais componentes da Unidade de Conversão de Potência (UCP) para um gerador heliotérmico de disco parabólico do tipo solar DS, e sobre o armazenamento de energia utilizando o gás hidrogênio. As abordagens e resultados dos estudos apresentados serão analisados e sua relevância será avaliada, a fim de nortear o desenvolvimento de novos estudos a fim de demonstrar o potencial da geração heliotérmica de energia elétrica com esse tipo de sistema.

## **2. Sistema solar dish Stirling (DS)**

O sistema de geração energética do tipo solar DS consiste em um concentrador parabólico espelhado que concentra luz solar numa pequena área localizada no seu foco. A alta temperatura atingida no ponto focal é usada como fonte de calor para um motor Stirling que pode operar com alta eficiência e sem qualquer emissão. A irradiação solar coletada e refletida pelo concentrador parabólico incide numa câmara oca chamada receptor, onde é convertida em energia térmica e então absorvida por uma série de tubos metálicos de onde o motor Stirling capta o calor e o converte em energia mecânica, comprimindo e expandindo seu gás de trabalho, comumente hidrogênio ou hélio, e então movendo um gerador elétrico, que converte a energia mecânica em eletricidade (LI; CHOI; YANG, 2014).

Em suas pesquisas Li, Choi e Yang (2014) desenvolvem um modelo adiabático de um motor Stirling a fim de estudar uma planta de sistemas DS *on grid* (conectados à rede de distribuição). Foi desenvolvido um modelo de um motor Stirling com controle de pressão média variável, considerando-se as suas perdas. Baseado no modelo, foi projetado um esquema de controle de temperatura para o receptor. Então, foi avaliado o desempenho do sistema em um regime estacionário de operação. O trabalho apresenta uma análise do potencial de operação do sistema em velocidade variável, visando maximizar o controle energético e mitigar o efeito da intermitência na entrada de energia, condição característica da geração solar.

Barreto e Canhoto (2017), a fim de determinar a produção energética de um motor Stirling do tipo beta para geração heliotérmica, também desenvolvem um modelo para todo o sistema e o simularam, tanto no regime transiente quanto no estacionário. O modelo inclui a concentração da radiação solar, a transferência de calor para o receptor, a conversão através do ciclo termodinâmico, e a conversão em eletricidade. Os componentes a serem otimizados foram identificados a fim de se aumentar a eficiência global do sistema. Esse trabalho tem como uma

de suas principais contribuições a integração de vários modelos, considerando-se todos os processos de conversão energética e permitindo que seja determinada a eficiência de cada um dos componentes, individualmente. Melhorar a eficiência de um componente resulta no aumento da eficiência global do sistema.

Também está apresentado no trabalho de Beltran e colaboradores (2012), um modelo matemático para prever o comportamento térmico e ótico de um sistema DS com um receptor de cavidade. O trabalho apresenta um estudo paramétrico das principais variáveis geométricas, onde é analisada a influência das variáveis climáticas no comportamento térmico do sistema. O modelo considera erros no concentrador, fator de interceptação, radiação emitida e refletida e a perda de calor por convecção. Para sua validação os resultados do modelo são comparados aos demais presentes na literatura.

### **3. Unidade de conversão de potência**

A unidade de conversão de potência é o subsistema do gerador solar DS responsável por converter a energia térmica, proveniente do sol e concentrada pelo arranjo de espelhos, em energia elétrica. Este subsistema consiste em: receptor, motor Stirling e gerador.

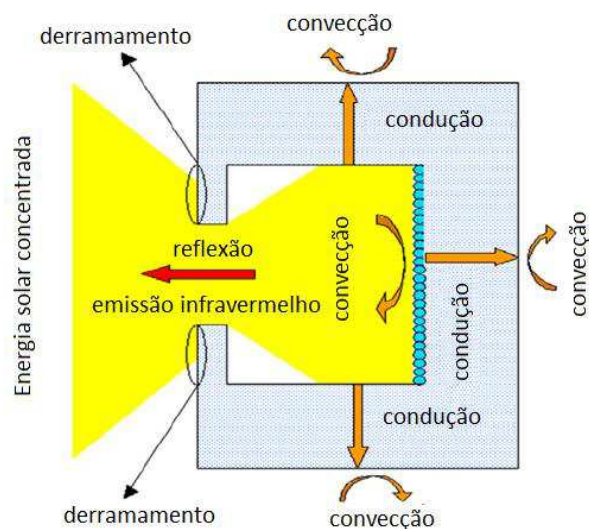
#### **3.1. Receptor**

Na geração heliotérmica que usa um sistema de disco parabólico, o calor é focado na parte quente do motor, fazendo-o atingir altas temperaturas, o que resulta em perdas por convecção, radiação e condução. O receptor é o componente onde é focada a energia térmica concentrada pelo arranjo de espelhos e tem a função de minimizar as perdas térmicas distribuindo uniformemente o fluxo de calor na superfície da cavidade (HUSSAIN et al. 2016). O fluxo de calor no receptor pode ser observado da Figura 2.

Hussain e colaboradores (2016) estudam o processo de transferência de calor no receptor de cavidade através de experimentos, proporcionando um máximo aproveitamento do calor e uma mínima taxa de perdas. Com isso, através de parâmetros adimensionais, são caracterizadas quatro configurações de receptor e então apontada a mais adequada para um sistema proposto.

Um modelo numérico de um receptor de cavidade é também elaborado por Reddy e Kumar (2009) a fim de obter uma estimativa dos efeitos da perda de calor por convecção natural. O trabalho compara o modelo proposto com outros modelos conhecidos, concluindo que ele pode ser usado para simular as perdas em um coletor de disco parabólico.

Figura 2 – Fluxo de calor no receptor



Fonte: Adaptado de Nepveu, Ferriere e Bataille (apud BARLEV; VIDU; STROEVE, 2011)

Após a realização de um estudo numérico investigando a influência das características da abertura do receptor nas perdas de calor por convecção natural neste componente, Wu, Xiao e Li (2011) revelam em seu trabalho que o impacto de tais perdas tem relação direta com o ângulo de inclinação do componente. Os autores então desenvolvem uma correlação incorporando a posição da abertura, seu tamanho, a temperatura na parede e o ângulo de inclinação, e introduzem uma nova configuração de receptor para sistemas de disco parabólico de alta e média temperatura obtendo um menor desvio em testes experimentais.

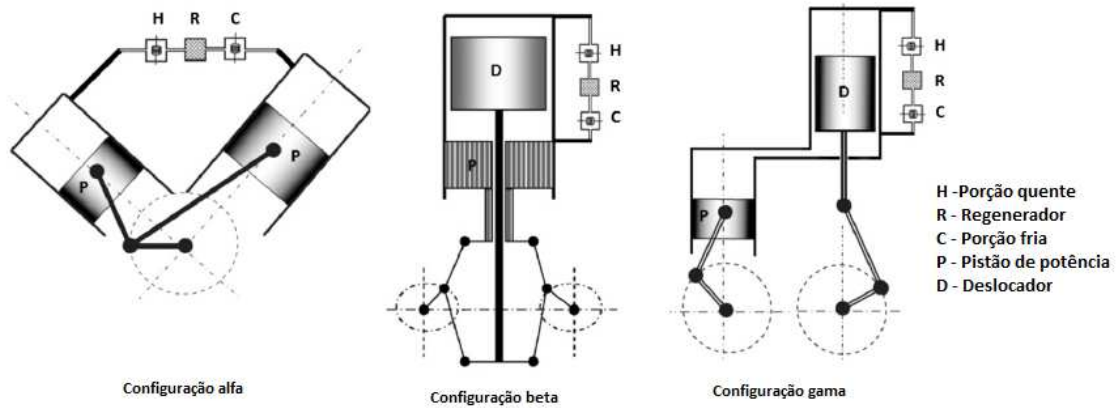
### 3.2. Motor Stirling

O motor Stirling é um sistema regenerativo de ciclo fechado que apresenta boas propriedades teóricas, como uma alta eficiência termodinâmica, e tem sido fruto de muitas pesquisas recentes, por serem de construção simples, virtualmente silenciosos, de operação segura, termicamente regenerativos. Por serem de aquecimento externo, eles podem ser acionados por diversas fontes controladas de calor, com baixa ou nenhuma emissão, tais como: biomassa, geotérmica, rejeito industrial ou mesmo solar, como está proposto neste trabalho.

Existem três configurações básicas para o motor Stirling: a alfa, com o pistão frio e o quente montados em cilindros separados, um de cada lado do regenerador; a beta, com o pistão de potência e o deslocador em um mesmo cilindro; e a gama, com o pistão de potência e o deslocador em cilindros diferentes (Figura 3) (ARAOZ et al, 2015; ALFARAWI; AL-DADAH; MAHMOUD, 2016). Esse motor é o principal componente do sistema solar DS, pois é o

responsável por converter o calor proveniente do sol, através da compressão e expansão de um gás, em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica, com o auxílio de um gerador.

Figura 3 - Configurações básicas para o motor Stirling



Fonte: Adaptado de Alfarawi, Al-Dadah e Mahmoud (2016)

Em suas pesquisas, Alfarawi, Al-Dadah e Mahmoud (2016) desenvolveram um modelo para a simulação de um motor Stirling gama baseado na reconfiguração de uma análise adiabática não-ideal. Este modelo foi validado através de medições experimentais em um protótipo. Um estudo paramétrico também foi executado para investigar os efeitos dos ângulos de fase, do tipo de gás, da matriz regeneradora, e do volume morto na performance do motor.

W. Chen, Wong e H. Chen (2014), por sua vez, fazem um estudo experimental de um motor Stirling gama usando gás hélio como fluido de trabalho, a fim de entender os efeitos de vários parâmetros do regenerador no desempenho geral do motor. O regenerador é um componente que funciona como uma unidade de armazenamento de calor, absorvendo parte do calor do gás quente e liberando novamente esse calor para o gás frio, conseqüentemente, uma menor quantidade de calor será necessária para que o motor funcione. Este componente torna o motor Stirling eficiente, independentemente de sua configuração.

No seu trabalho, Araoz e colaboradores (2015) implementam uma análise a fim de integrar as interações termodinâmicas, térmicas e mecânicas que influenciam a performance de motores Stirling. A metodologia numérica foi escolhida para identificar as possíveis causas que limitam a performance do motor. A simulação permitiu a avaliação do efeito de diferentes designs e parâmetros operacionais sobre o desempenho do motor, resultando em diferentes curvas de performance, que auxiliam a identificação das faixas onde os parâmetros reduzem a eficiência do motor.

Para demonstrar experimentalmente o potencial do motor Stirling aplicado na tecnologia de geração de energia solar concentrada, Sripakagorn e Srikam (2011) desenvolveram um protótipo de um motor Stirling de configuração beta e temperatura moderada. O trabalho demonstra que este motor pode atingir performance comparável aos de alta temperatura, mesmo com um projeto mais simples e com menor custo. Segundo os autores, esse tipo de motor permite o uso de material de menor custo e configurações mecânicas mais simplificadas.

#### **4. Armazenamento de energia**

A integração de um sistema de armazenamento energético à planta solar permite um aumento do tempo de operação do sistema e compensa as flutuações no fornecimento de energia solar que impactam na produção energética. Alguns métodos de armazenamento energético são: o armazenamento em banco de baterias, o armazenamento térmico e o armazenamento químico, como em um combustível ou usando outra substância como vetor energético, como o hidrogênio. O armazenamento de energia a hidrogênio se dá com a produção de gás hidrogênio através da eletrólise da água nos períodos de produção excedente de energia, e sua conversão novamente em eletricidade através do seu uso em células a combustível, quando necessário.

No seu trabalho, Matos, Silva e Varella (2015) realizam uma análise comparativa entre a utilização de um sistema de banco de baterias e do hidrogênio como armazenador de energia. De um modo complementar, Das, Sinha e Roy (2014) desenvolveram modelos matemático para um sistema solar dish híbrido integrado com um gerador a diesel, armazenamento energético usando baterias, eletrolisador e célula combustível. Sihem, Sami e Adnane (2015) aplicaram uma técnica de gerenciamento baseado em uma abordagem multi-agente em um sistema híbrido, com uma fonte de energia solar, um sistema de recuperação baseado em células combustível e dois tipos de armazenamento, um com eletrolisador, para armazenar energia na forma de hidrogênio, e um com ultracapacitor, para armazenar energia elétrica, assim protegendo o sistema contra flutuações.

#### **5. Análise**

Os trabalhos estudados abordam de forma semelhante vários tópicos pertinentes ao processo de geração de energia elétrica heliotérmica, e ao funcionamento e avaliação de desempenho do sistema solar DS e seus componentes, principalmente através de modelos matemáticos e análises comparativas.

Nos seus respectivos trabalhos, Li, Choi e Yang (2014), Barreto e Canhoto (2017) e Beltran e colaboradores (2012) desenvolvem modelos matemático para o sistema DS, avaliando as



principais perdas e analisando a eficiência do sistema, possibilitando uma compreensão ampla e a melhoria da eficiência do sistema DS. De modo complementar, Hussain e colaboradores (2016), Reddy e Kumar (2009) e Wu, Xiao e Li (2011) focam a sua pesquisa no receptor, componente importante para os sistemas com disco parabólico, modelando-o matematicamente e avaliando sua eficiência. Voltando sua pesquisa especificamente para o motor Stirling e seus componentes; Alfarawi, Al-Dadah e Mahmoud (2016) modelam um motor do tipo gama, validando-o experimentalmente; W. Chen, Wong e H. Chen (2014) focam nos parâmetros do regenerador, componente indispensável para um bom desempenho do motor Stirling; Araoz e colaboradores (2015) implementam uma simulação numérica para identificar perdas no motor; e Sripakagorn e Srikam (2011) desenvolveram um protótipo de um motor Stirling avaliando sua performance. Matos, Silva e Varella (2015), Das, Sinha e Roy (2014) e Sihem, Sami e Adnane (2015) exploram nas suas pesquisas o processo de armazenamento de energia a hidrogênio, comparando-o a outros meios e o integrando a sistemas híbridos.

A partir da justaposição das pesquisas apresentadas temos uma visão clara da importância e funcionamento do sistema solar DS, seus componentes, suas principais variáveis operacionais, suas perdas, eficiências individuais dos componentes e do sistema como um todo.

## **6. Avaliação**

No estudo da geração heliotérmica através do sistema solar DS, nota-se uma predominância do uso de modelos matemática para dimensionar e estudar o sistema. Os modelos mais abrangentes, que abordam todo o sistema, permitem que se tenha um amplo entendimento do fluxo de energia através dos seus componentes, e uma observação clara das perdas em cada um desses componentes. Os modelos restritos a um componente específico possibilitam, através da investigação mais detalhada das características e dos mecanismos de perda, o desenvolvimento de um componente que, otimizando a sua performance individual, possa ser eficientemente integrado a um sistema completo de geração energética. Paralelamente, as pesquisas realizadas acerca dos meios de armazenamento energético, especificamente o armazenamento a hidrogênio, abordam um subsistema pouco discutido na literatura, mas que se mostra um elemento importante a ser adicionado aos sistemas com as características operacionais dos geradores heliotérmicos.

Apesar da confiabilidade dos modelos matemático descritos nas pesquisas em questão, a maioria dos modelos carece de uma validação experimental, observando-se especialmente a interação operacionais e construtivas entre os componentes e o desempenho do sistema diante de condições complexas de operação.

## 7. Conclusão

A geração de energia heliotérmica é uma alternativa interessante para o cenário energético atual. E, dentre os tipos de gerador heliotérmico, o sistema de disco parabólico (*solar dish*), com destaque para o modelo DS, se mostra bastante promissor, principalmente pela sua alta eficiência de conversão. Diversos estudos sobre este sistema têm sido feitos, na sua maioria com a elaboração de modelos matemáticos que estudam o fluxo de energia em todo o sistema, e o desempenho de seus componentes; ou analisam o efeito da variação de parâmetros específicos de um determinado componente em sua eficiência. Os sistemas de armazenamento de energia são partes importantes para os meios de geração com produção intermitente, como a geração solar. Dentre eles, o armazenamento a hidrogênio mostra-se uma alternativa interessante, mas ainda pouco estudada. Diante disso, são necessários estudos experimentais, onde se aplique o conhecimento teórico amplamente difundido na literatura, a fim de demonstrar o potencial da geração de energia elétrica por fonte heliotérmica utilizando o gerador solar DS.

## REFERÊNCIAS

- ALFARAWI, S.; AL-DADAH, R.; MAHMOUD, S. Enhanced thermodynamic modelling of a gamma-type Stirling engine. **Applied Thermal Engineering**. n. 106 p. 1380–1390, 2016.
- ARAOZ, Joseph A.; SALOMON, Marianne; ALEJO, Lucio; FRANSSON, Torsten H. Numerical simulation for the design analysis of kinematic Stirling Engines. **Applied Energy**. n. 159, p. 633–650, 2015.
- BARLEV, D; VIDU, R; STROEVE, P. Innovation in concentrated solar power. **Solar Energy Materials & Solar Cells**. n. 95 p. 2703–2725, 2011.
- BELTRAN, Ricardo; VELAZQUEZ, Nicolas; ESPERICUETA, Alma Cota; SAUCEDA, Daniel; PEREZ, Guillermo. Mathematical model for the study and design of a solar dish collector with cavity receiver for its application in Stirling engines. **Journal of Mechanical Science and Technology**. n. 26, v. 10, p. 3311–3321, 2012.
- CHEN, Wen-Lih; WONG, King-Leung; CHEN, Hung-En. An experimental study on the performance of the moving regenerator for a c-type twin power piston Stirling engine. **Energy Conversion and Management**. n. 77, p. 118–128, 2014.
- DAS, Dulal Ch.; SINHA, N.; ROY, A.K. Small signal stability analysis of dish-Stirling solar thermal based autonomous hybrid energy system. **Electrical Power and Energy Systems**. n. 63, p. 485–498, 2014.
- HUSSAIN, T.; ISLAM, M.; KUBO, I.; WATANABE, T. Study of heat transfer through a cavity receiver for a solar powered advanced Stirling engine generator. **Applied Thermal Engineering**. n. 104 p. 751–757, 2016.
- KALOGIROU, S. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**. n. 30, p. 231–295, 2004.
- LI, Y.; CHOI, S.; YANG, C. Dish-Stirling Solar Power Plants: Modeling, Analysis, and Control of Receiver Temperature. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**. v. 5, n. 2, abr. 2014.
- MATOS, Maiana Brito De; SILVA, Ennio Peres Da; VARELLA, Fabiana Karla De Oliveira Martins. Análise Energética Do Projeto De Um Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico Com Armazenamento de Energia Elétrica Através do Hidrogênio e Banco de Baterias. **Revista Brasileira de Energia**. v. 21, n 1, 2015.

NAVARRO, A; RAMÍREZ, L; DOMÍNGUEZ, P; BLANCO, M; POLO, J; ZARZA, E. Review and validation of Solar Thermal Electricity potential methodologies. **Energy Conversion and Management**. n. 126, p. 42–50, 2016.

REDDY, K.; KUMAR, N. An improved model for natural convection heat loss from modified cavity receiver of solar dish concentrator. **Solar Energy**. n. 83, p. 1884–1892, 2009.

REN21 – Renewable Energy for the 20st Century. **Renewables 2016: Global Status Report**. REN21 Secretariat c/o UNEP. Paris, France, 2016.

SIHEM, Nasri; SAMI, Ben Slama; ADNANE; Cherif. **International Journal of Electrical and Computer Engineering**. A Smart Management Approach Investigation for Hybrid Autonomous Power System Vol. 5, No. 6, December 2015, pp. 1275~1283.

SRIPAKAGORN, Angkee; SRIKAM. Chana. Design and performance of a moderate temperature difference Stirling engine. **Renewable Energy**. n. 36 p. 1728-1733, 2011.

WU, Shuang-Ying; XIAO, Lan; LI, You-Rong. Effect of aperture position and size on natural convection heat loss of a solar heat-pipe receiver. **Applied Thermal Engineering**. n. 31 p. 2787–2796, 2011.