

# MODELAGEM TERMODINÂMICA DE UMA PLANTA HELIOTÉRMICA DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

**Palavras-Chave:** ARMAZENAMENTO-TÉRMICO, ENERGIA-SOLAR, BALANÇO-ENERGÉTICO

**Autores(as):**

**LUMA ANTUNES DE OLIVEIRA, FEM – UNICAMP**

**Prof. Dr. CAIO HENRIQUE RUFINO, FEM - UNICAMP**

---

## INTRODUÇÃO:

Os impactos ambientais provocados pela emissão de gases do efeito estufa configuram uma urgente problemática mundial: O ano de 2023 alcançou uma temperatura média global cerca de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, segundo a Organização Meteorológica Mundial. Essa conjuntura é, inegavelmente, fruto de causas antropológicas, como afirma o IPCC, visto que há um crescimento acentuado da emissão de gases do efeito estufa após o processo de industrialização.

De acordo com o Climate Watch, o setor da energia chega a emitir 75% do total de gases do efeito estufa, sendo a categoria de geração de eletricidade e de calor as responsáveis por essa porcentagem alarmante. Dessa maneira, faz-se necessário buscar fontes alternativas de energia que mitiguem a emissão desses gases do efeito estufa.

A energia solar é uma energia alternativa inexaurível que apresenta um grande potencial no Brasil, por ser um país intertropical. Usualmente, gera-se energia elétrica a partir da radiação solar de duas maneiras: por meio de placas fotovoltaicas e por meio da concentração de raios solares de modo a aquecer um fluido que deve percorrer e trocar calor em um ciclo termodinâmico de Rankine. O objeto de estudo dessa pesquisa científica trata-se da segunda maneira, também conhecida como forma heliotérmica. Uma questão intrínseca à energia solar são incompatibilidades entre a oferta e a demanda de energia durante 24 horas. Portanto, urge que essa questão seja solucionada por ferramentas como uma tecnologia de armazenamento de energia térmica, o que aumenta a adaptabilidade da energia solar como uma forma de estratégia para suprir uma demanda populacional.

A presente pesquisa científica é um recorte feito sobre o cenário da energia solar, dando foco no armazenamento térmico - fundamental para o sucesso da energia solar heliotérmica no cenário das energias sustentáveis em missão de reduzir os gases do efeito estufa. Dessa maneira, esse estudo tem como propósito determinar parâmetros como o local de instalação da planta e sua radiação solar, fluido de transferência de calor e capacidade da planta para então realizar um balanço energético no armazenamento térmico, gerando resultados a partir da variação de vazão mássica e de fluidos.

## METODOLOGIA:

### LOCAL DE INSTALAÇÃO DA PLANTA:

Em primeiro plano, para definir o local de instalação da planta é necessário ter em vista que o principal critério de decisão é a radiação solar. Um passo anterior a isso é compreender que as nuvens atuam como principais moduladores da radiação solar que incide na superfície, dessa maneira a irradiância solar é composta por suas componentes direta e difusa conforme apresenta a figura 1. No caso da concentração de radiação solar, a irradiação de interesse é a direta normal conhecida como DNI – Direct Normal Irradiation.

Segundo Philibert et. Al (2010), para que a configuração heliotérmica seja vantajosa em relação a outra configuração, como a fotovoltaica, a irradiação solar direta normal deve ser superior a  $5,48 \frac{kWh}{m^2}/dia$ . Nesse sentido, os dados de irradiação direta normal utilizados no presente trabalho foram os disponibilizados pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª edição (2017). Os dados são disponibilizados para Excel de modo que contenha a média anual e de cada mês da DNI referente a diversos municípios brasileiros. Tendo esses dados, foi feita uma filtragem tanto para a média anual, quanto para as médias mensais, de modo que todas essas médias sejam superiores a  $5,48 \frac{kWh}{m^2}/dia$ . A partir disso, foram selecionadas as 10 localizações com maiores médias anuais para em seguida ser levado em consideração o segundo e último critério: o acesso a água. O fator responsável por avaliar a disponibilização do recurso água é a tarifa média da água em  $\frac{R\$}{m^3}$  de cada município, esses dados são disponibilizados pelo Instituto Água e Saneamento e Infosanbas.

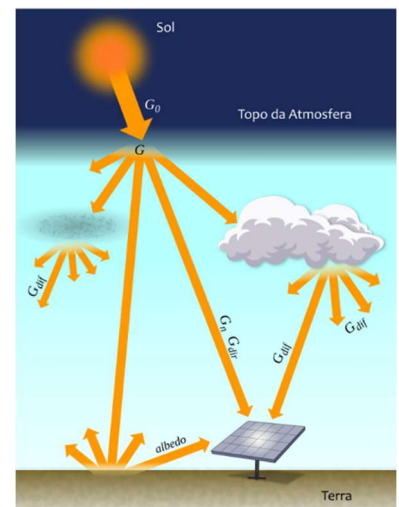


Figura 1 – Irradiância solar e suas componentes.

### TIPO DE COLETOR SOLAR:

Como dito anteriormente, a geração de energia heliotérmica é baseada na concentração de radiação solar direta normal. Para isso, são utilizados espelhos que refletem e concentram as irradiâncias solares e assim aquecem um fluido de transferência de calor. Os coletores realizam essa função e, de modo geral, existem quatro tipos de tecnologia de coletores solares acessíveis. A figura 2 ilustra e resume o funcionamento de cada tecnologia.

Para esta pesquisa, o tipo de coletor a ser considerado no estudo é o Cilíndrico Parabólico, visto que é um tipo de coletor que apresenta estrutura leve, é

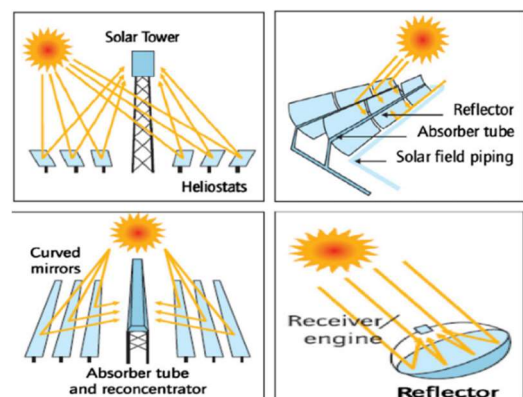


Figura 2 – Tipos de coletores solar: a) Torre central b) Cilíndrico Parabólico c) Fresnel linear e d) Disco parabólico.

tecnologicamente acessível, apresenta baixo custo e sua faixa de temperatura de operação é de 20 a 400°C. Ademais, é o tipo de coletor que apresenta uma tecnologia mais desenvolvida devido ao fato de ser a mais utilizada: correspondem a cerca de 96.3% dos coletores usados. Após ter definido o tipo de coletor solar, é necessário buscar na literatura valores da eficiência desse coletor em sua aplicação que façam sentido para o estudo feito.

### **CAPACIDADE DA PLANTA:**

A capacidade geração elétrica da planta é um requisito a ser definido a partir da análise de outras pesquisas e plantas heliotérmicas atualmente em funcionamento. Após a definição desse requisito e juntamente com a eficiência do coletor solar e a eficiência do ciclo termodinâmico, é possível definir a taxa de calor que deve ser transferido do fluido presente no sistema de armazenamento térmico e que recebe calor dos raios solares. Podemos representar isso por meio da seguinte equação:

$$\dot{Q}_H = \frac{\dot{W}}{\eta_{ciclo}\eta_{coletor}}$$

### **CONFIGURAÇÃO DO ARMAZENAMENTO TÉRMICO:**

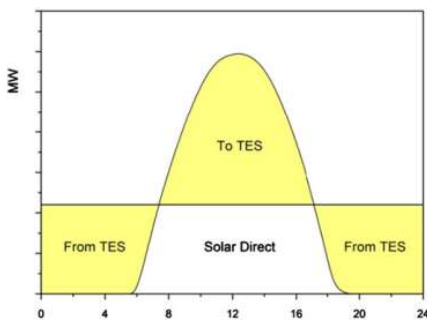


Figura 3 - Curva que apresenta a irradiação solar ao longo do dia e a atuação do TES – termal energy storage – como fornecedor e armazenador de energia.

O sistema de armazenamento térmico é fundamental para uma planta heliotérmica devido a diferença entre a geração de energia térmica e o consumo que ocorre ao longo do dia. A figura 3 representa a lógica de funcionamento do armazenamento térmico, de modo que a linha horizontal indica a demanda de calor a ser transferido para o ciclo de forma a satisfazer a demanda de energia elétrica. Ademais, a configuração do armazenamento geralmente é feita por sistemas de tanque em que pode ser sistema indireto com dois tanques, direto com dois tanques ou um tanque único.

### **FLUIDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:**

Para esse estudo, foram considerados 4 tipos de óleos térmicos como fluidos de transferência de calor: Therminol VP-1, Xceltherm 600, Syltherm XLT e Dowtherm A. Com o conhecimento do calor específico e da densidade desses óleos, é possível avaliar as suas respectivas performances, aplicando-os nos balanços energéticos a serem feitos.

### **BALANÇO ENERGÉTICO:**

Para realizar o balanço energético é necessário primeiramente determinar todos os tópicos supracitados e, sendo assim, é a última etapa a ser feita. O balanço energético deve lidar com equações diferenciais e para isso deve ser implementado método matemático de Runge-Kutta por meio do software Matlab.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

O local definido para a instalação da planta é a cidade de Sento Sé na Bahia, visto que é a cidade que apresenta o maior DNI e ao mesmo tempo a menor tarifa média de água, como pode-se ver na tabela 1. Esse fator simplificou a decisão por ser o que melhor atende aos dois critérios. Ademais, algo interessante é que as 10 cidades com maiores DNI são baianas e muitas delas ficam próximo ao rio São Francisco, como é o caso de Santo Sé.

| Cidade                       | DNI<br>(Wh/m <sup>2</sup> /dia) | Tarifa média<br>de água<br>(R\$/m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------|---------------------------------|--|
| Sento Sé - BA                | 6465                            | 1,20   |
| Xique-Xique, BA              | 6443                            | 1,79   |
| Remanso, BA                  | 6429                            | 1,95   |
| Gentio do Ouro - BA          | 6404                            | 5,08   |
| Barra - BA                   | 6385                            | 4,91   |
| Pilão Arcado - BA            | 6360                            | 3,76   |
| Muquém do São Francisco - BA | 6351                            | 5,08   |
| Itaguaçu da Bahia - BA       | 6316                            | 2,06   |
| Casa Nova - BA               | 6311                            | 2,40   |
| Ibotirama - BA               | 6305                            | 5,05   |

Tabela 1 – Valores de DNI e da tarifa de água para os 10 municípios brasileiros com médias mensais e anuais superiores ao recomendado.

Em relação aos coletores solares, a eficiência é definida com base no estudo feito por Givaldo Pereira (2023) que satisfaz ao presente caso de estudo e o seu valor médio é de 54.84%. Outro aspecto relevante é a determinação da capacidade da planta de geração de eletricidade, que nesse caso, foi optada em ser um valor de 4,7 MW e a configuração da planta final é a mesma que a apresentada na figura 4. Nesse sentido, o armazenamento térmico é composto por dois tanques sistematizados diretamente, sendo um tanque de temperatura fria e o outro de temperatura quente. Ademais o modo de armazenar energia térmica é definida como calor sensível e nesse caso é válida a seguinte equação para expressar a energia armazenada:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Sabendo-se disso, foi possível chegar no seguinte balanço energético composto por um sistema com duas equações diferenciais de primeira ordem, sendo  $T_H$  e  $T_C$  as temperaturas quente e fria,

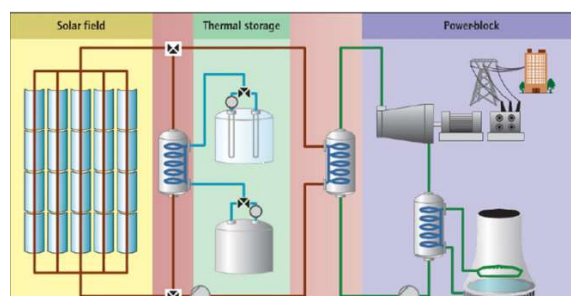


Figura 4 – Configuração final da planta com armazenamento térmico.

respectivamente, dos tanques de armazenamento térmico.

$$\frac{dT_H}{dt} = \frac{\dot{m} \cdot c_p(T)}{m \cdot c_p(T)} (T_H - \frac{\dot{Q}_H}{\dot{m} \cdot c_p} - T_C)$$
$$\frac{dT_C}{dt} = \frac{\dot{m} \cdot c_p(T)}{m \cdot c_p(T)} (T_C - \frac{(\frac{DNI}{24}) \cdot A}{\dot{m} \cdot c_p} - T_H)$$

Sendo  $c_p$ ,  $\dot{m}$  e  $m$  o calor específico, a vazão mássica e massa do óleo térmico, e  $A$  igual a área total dos coletores, que pode ser definida como a razão entre  $\dot{Q}_H$  e DNI. Por fim, a distribuição de temperatura ao longo do tempo pode ser obtida por meio da solução numérica de Runge-Kutta, em que se pode variar os parâmetros do óleo térmico para observar o comportamento dessa distribuição.

## CONCLUSÕES:

O presente estudo apresentou seu foco na sistemática de armazenamento de energia térmica, presente em uma planta heliotérmica, realizado por um sistema direto de dois tanques, um frio e outro quente, em que o fluido de transferência de calor é óleo térmico. Inicialmente, foi definido como local de instalação da planta a cidade de Sento Sé – BA, a qual apresenta uma DNI média anual  $6465 \frac{kWh}{m^2} / dia$ . Ademais, outros parâmetros também são definidos: os óleos térmicos a serem avaliados são o Therminol VP-1, o Xceltherm 600, o Syltherm XLT e o Dowtherm e a capacidade da planta é definida como de 4,7 MW. Por fim, são obtidas as duas principais equações do balanço energético, o qual foi possível por meio da definição de sistemas e parâmetros e deve ser resolvida numericamente. Dessa maneira, o armazenamento de energia térmica é um tópico fundamental em um cenário que deve fortalecer a atuação da energia solar no panorama de emergência climática atual.

---

## BIBLIOGRAFIA

- ALVA, Guruprasad; LIN, Yaxue; FANG, Guiyin. An overview of thermal energy storage systems. **Energy**, v. 144, p. 341-378, 2018.
- PHILIBERT, C., FRANKL, P., DOBROTKOVA, Z.. **Technology roadmap: Concentrating Solar Power**. Internacional Energy Agency (IEA), 2010. Disponível em: <[https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp\\_roadmap.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp_roadmap.pdf)>. Acesso em: 26. Mar. 2017.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>
- ZHANG, H. L. et al. Concentrated solar power plants: Review and design methodology. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 22, p. 466-481, 2013.
- SILVA JÚNIOR G. **Caracterização de uma planta para a produção de hidrogênio a partir de energia solar**. Campinas, dez. 2023.
- MANENTI, Flavio; RAVAGHI-ARDEBILI, Zohreh. Dynamic simulation of concentrating solar power plant and two-tanks direct thermal energy storage. **Energy**, v. 55, p. 89-97, 2013.