



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DE SISTEMA TÉRMICO SOLAR PARA AUMENTO DE EFICIÊNCIA NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NO CEARÁ TECHNICAL FEASIBILITY STUDY OF A SOLAR THERMAL SYSTEM TO INCREASE EFFICIENCY IN GREEN HYDROGEN PRODUCTION IN CEARÁ

Paulo Henrique Pereira Silva¹, Gustavo Azevedo Diogenes², Marcos Souto Lopes Bezerra³, Maria do Socorro Santos Sousa⁴

¹ Universidade de Fortaleza – paulo.henrique1402@unifor.br

² Universidade de Fortaleza – gustavoazevedod@gmail.com

³ Universidade Federal do Ceará – marcos.xis@gmail.com

⁴ Universidade de Fortaleza – mariasatos22@edu.unifor.br

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo analisar a viabilidade técnica da aplicação de sistemas solares térmicos como estratégia para aumentar a eficiência na produção de hidrogênio verde no estado do Ceará. Inserido no contexto da transição energética global e considerando o elevado potencial solar da região, o trabalho propõe investigar a integração da energia térmica solar em processos de geração de hidrogênio, com ênfase na otimização do consumo energético, na redução de custos operacionais e na ampliação da competitividade dessa fonte limpa frente a outras matrizes energéticas. A metodologia abrangeu a revisão de dados de irradiação solar no Ceará, bem como para validação de conceitos e parâmetros técnicos, foi construído um protótipo em escala reduzida do STS, possibilitando a realização de ensaios experimentais com eletrólise a partir de água previamente aquecida. A comparação entre os resultados teóricos e experimentais demonstrou coerência no comportamento térmico do sistema. A potência útil calculada por duas metodologias (via coletor e via modelagem matemática) apresentou boa consistência, validando o modelo adotado, os valores obtidos confirmaram a tendência de aquecimento prevista, com ganhos médios de 2 a 5 °C entre a entrada e a saída. O protótipo desenvolvido, mesmo em escala reduzida, apresentou bom desempenho dentro das condições ambientais analisadas.

Palavras-chave: Energia solar térmica; Hidrogênio verde; Viabilidade técnica; Eficiência energética; Transição energética; Ceará; Energias renováveis.

ABSTRACT

The present study aims to analyze the technical feasibility of applying solar thermal systems as a strategy to increase efficiency in green hydrogen production in the state of Ceará. Within the context of the global energy transition and considering the region's high solar potential, the work proposes to investigate the integration of solar thermal energy into hydrogen generation processes, with emphasis on optimizing energy consumption, reducing operational costs, and enhancing the competitiveness of this clean source compared to other energy matrices. The methodology included a review of solar irradiation data in Ceará, and, for the validation of concepts and technical parameters, a reduced-scale prototype of the STS was built, enabling experimental tests with electrolysis using preheated water. The comparison between theoretical and experimental results showed coherence in the thermal behavior of the system.



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

The useful power calculated by two methodologies (through the collector and through mathematical modeling) presented good consistency, validating the adopted model. The obtained values confirmed the predicted heating trend, with average gains of 2 to 5 °C between inlet and outlet. The developed prototype, even at reduced scale, showed good performance under the analyzed environmental conditions.

Keywords: Solar thermal energy; Green hydrogen; Technical feasibility; Energy efficiency; Energy transition; Ceará; Renewable energy.

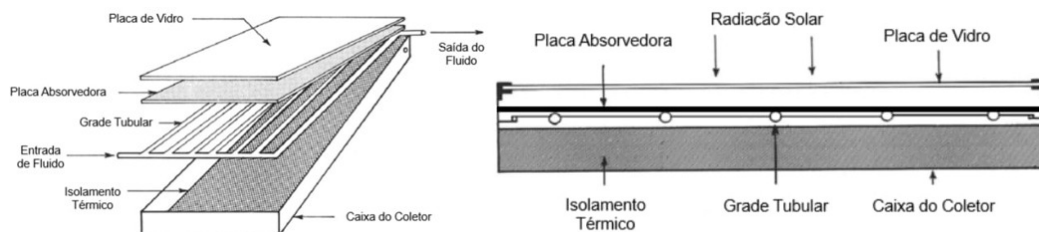
1 INTRODUÇÃO

O hidrogênio verde surge como uma das soluções mais promissoras para a descarbonização da matriz energética, por ser produzido a partir de fontes renováveis e não gerar emissões de carbono em sua utilização. No Brasil, o Ceará destaca-se pelo grande potencial solar e eólico, criando condições favoráveis ao desenvolvimento dessa tecnologia. Além da energia fotovoltaica, os sistemas solares térmicos oferecem uma alternativa relevante, permitindo o uso direto da radiação solar para aquecimento e contribuindo para otimizar processos produtivos, reduzir o consumo de eletricidade e aumentar a eficiência na produção de hidrogênio verde. Este estudo analisa a viabilidade técnica dessa aplicação, reforçando o papel estratégico do Ceará como referência em energias renováveis e ampliando a competitividade e a sustentabilidade do setor energético nacional. O objetivo da pesquisa é investigar o impacto energético da substituição da energia elétrica do pré-aquecimento da água que alimenta o eletrolisador, por aquecimento térmico solar, a partir de Sistemas Térmicos Solares (STS). Essa forma alternativa de aquecimento, utilizando fonte solar abundante e gratuita deve gerar um repercutir na redução do custo de produção do hidrogênio verde, tendo em vista que a energia elétrica é um dos insumos mais onerosos de OPEX.

2 METODOLOGIA

A presente pesquisa adotou uma abordagem exploratória e aplicada, combinando revisão bibliográfica e experimentação prática. Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico para compreender os princípios de funcionamento de um Sistema Térmico Solar (STS), identificando os principais parâmetros técnicos necessários ao seu adequado dimensionamento no contexto estudado. A figura 1 mostra o STS que foi usado como referência para construção do protótipo. Se trata de uma caixa fechada que através da radiação que a atravessa a partir da parte superior transparente, retém o calor e o transfere para o fluido de trabalho que passa dentro dela através de um circuito bom condutor de calor.

Figura 1 – Visão explodida e frontal do Sistema Térmico Solar usado como referência.





Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Em paralelo, conduziu-se uma modelagem matemática, considerando os diferentes parâmetros de um dos STS escolhidos, contemplando as diversas variáveis de um sistema como esse em um balanço térmico, tais como vazão mássica do fluido, índice de radiação local e elevação da temperatura da água. Para validação do modelo matemático e parâmetros técnicos, foi construído um protótipo em escala reduzida do STS, possibilitando a realização de ensaios experimentais com aquecimento da água que futuramente alimentaria o eletrolisador. Os dados obtidos em escala laboratorial devem servir como referência para o dimensionamento de um STS em escala real, projetado para atender às demandas de produção de hidrogênio verde no Ceará. Por fim, elaborou-se um relatório consolidando a descrição qualitativa e quantitativa da pesquisa, os resultados obtidos e recomendações para estudos futuros. Esses achados também serviram de base para a produção de artigos científicos e para a submissão de trabalhos em eventos acadêmicos e em congressos de abrangência nacional.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelagem matemática

A modelagem matemática do sistema foi construída a partir dos balanços de energia no coletor solar. O modelo analítico para cálculo da potência útil é mostrado na equação (1) a partir do modelo estacionário clássico, no qual $Q_{\text{útil}}$ representa a potência útil do sistema em Watts, A_c é a área do coletor em metros quadrados, η é a eficiência óptica do sistema, G é a irradiância solar local (W/m^2), U é o coeficiente de perda térmica ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), T_m , T_a , T_{in} , e T_{out} são respectivamente a temperatura média, ambiente, de entrada e de saída da água no sistema, dadas em (K).

$$Q_{\text{útil}} = A_c \cdot [(\eta \cdot G) - U_{\text{total}} \cdot (T_m - T_a)] \quad (1)$$

$$\text{Em que } T_m = (T_{in} + T_{out}) / 2 \quad (2)$$

A potência útil também pode ser descrita a partir da equação do aquecimento do fluido:

$$Q_{\text{útil}} = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{out} - T_{in}), \quad (3)$$

Onde $\dot{m}$ é a vazão mássica do fluido (g/s) e c é o calor específico da água.

Igualando as equações (1) e (3) e isolando T_{out} , que é a temperatura de saída que o modelo analítico busca prever a partir das variáveis destacadas, temos:

$$T_{out} = \frac{(\dot{m} \cdot c \cdot T_{in}) + (A_c \cdot \eta \cdot G) - (1/2 A_c \cdot U \cdot T_{in}) + A_c \cdot U \cdot T_a}{(\dot{m} \cdot c) + 1/2 A_c \cdot U} \quad (4)$$



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

A partir da equação (4) foi possível fazer previsões da temperatura de saída da água considerando a mudança de variáveis como a temperatura de entrada da água e temperatura ambiente. Abaixo segue uma lista das constantes consideradas:

- Área do coletor (A): a ser dimensionada (m^2)
- Irradiância (G): $241,67 \text{ W/m}^2$ (Média Fortaleza)
- Eficiência ótica (η): 0,70 (Valor inicial típico encontrado na literatura e inclui transmitância da tampa + absortividade da placa)
- Perdas globais (U): $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (Estimativa baseada na literatura e inclui condução + convecção + radiação)
- Calor específico da água (c): $4184 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- Densidade da água: 995 kg/m^3 (aprox. $30\text{--}35^\circ\text{C}$)

Importante considerar que conversões entre unidades como no caso da temperatura (de Kelvin para graus Celsius), já foram previstos no modelo.

Dimensionamento

O dimensionamento do protótipo foi orientado para atender às necessidades de preaquecimento da água de um eletrolisador do tipo PEM. Ao definir como faixa operacional o aquecimento de 25°C (entrada) até 80°C (saída). A potência útil calculada necessária foi de $6,67 \text{ W}$, suficiente para o gradiente térmico necessário. A partir desse valor, determinou-se a vazão mássica de operação em $0,029 \text{ kg/s}$ (29 mL/s). Esse processo de dimensionamento assegurou que o sistema fosse compacto, eficiente e adaptado às condições médias de radiação solar da cidade de Fortaleza.

Condições Ambientais

As condições ambientais consideradas nos testes foram:

- Temperatura ambiente média: 27°C .
- Velocidade do vento: não considerada no cálculo, mas reconhecida como fator de perdas por convecção.
- Inclinação e orientação: definida para captar o máximo de radiação solar ao longo do dia, utilizando suporte de madeira.

Esses parâmetros foram fundamentais para os cálculos de perdas térmicas e eficiência global do coletor, determinando o desempenho esperado em operação real.

Características do Coletor Solar

O coletor solar plano foi projetado com foco em baixo custo, eficiência e simplicidade construtiva. Suas principais características são:

- Área de absorção: $0,16 \text{ m}^2$ (formato quadrado, $0,40 \text{ m}$ de aresta).
- Absorvedor: chapa de zinco de $390\text{mm} \times 390\text{mm} \times 1 \text{ mm}$
- Cobertura: Chapa Acrílica de $440\text{mm} \times 440\text{mm} \times 4 \text{ mm}$
- Isolamento térmico: placa de espuma de $390\text{mm} \times 390\text{mm} \times 40\text{mm}$, para minimizar perdas por condução e convecção.
- Estrutura: caixa de madeira $410\text{mm} \times 410\text{mm} \times 86 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ de espessura com corte e dobra.



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

- Grade tubular: dois tubos de cobre de diâmetro interno de 3/8" e quatro tubos de cobre de 1/2" com 460 mm de comprimento, 15 mm de diâmetro e 1mm de espessura, conectados ao absorvedor.

A figura mostra uma visão do protótipo construído de maneira frontal e lateral. A alimentação de água foi mantida constante e não foi incluído neste projeto sistema de armazenamento da água de saída, pois esse não era o escopo principal.

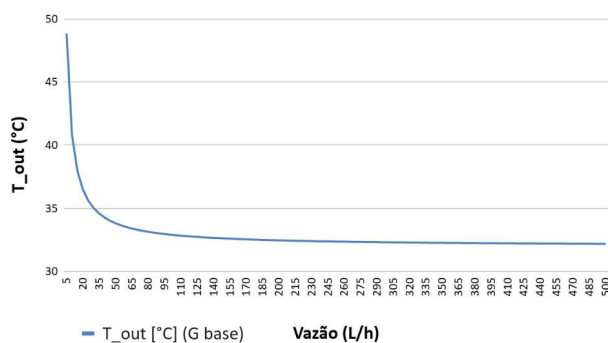
Figura 2 – Visão frontal e lateral do protótipo do sistema térmico solar modelado



Resultados Teóricos

A partir da modelagem analítica realizada, foi montada uma planilha considerando a equação (4). A temperatura de saída da água foi calculada para uma série de valores de vazão do fluido e radiação solar horária uma (baseada na irradiância). A figura 3 mostra o comportamento do sistema térmico solar em diferentes vazões do fluido.

Figura 3: Comportamento da temperatura de saída do fluido com relação à vazão.



Na figura 3, é possível perceber que em baixas vazões (5–20 L/h), é esperado que o ganho de temperatura da água possa chegar a 4–5 °C acima da entrada. Por outro lado, em vazões mais elevadas, é previsto que a temperatura de saída tende a se aproximar da temperatura de entrada, devido à redução do tempo de residência no coletor. É possível notar também na figura 3 que o comportamento da temperatura de saída do fluido a partir da vazão e irradiância reforça a previsibilidade do sistema em condições controladas e mostra como o dimensionamento pode ser ajustado para atender diferentes demandas de operação.

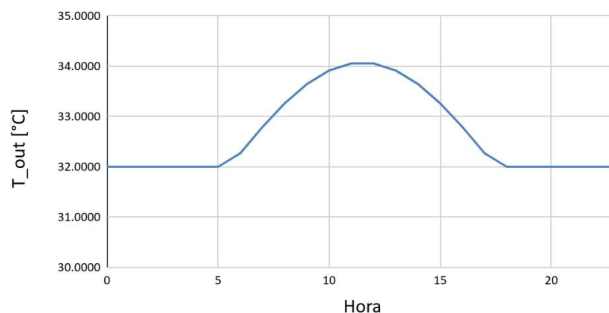


Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Figura 4: Comportamento do fluido de saída com relação à variação de radiação solar horária



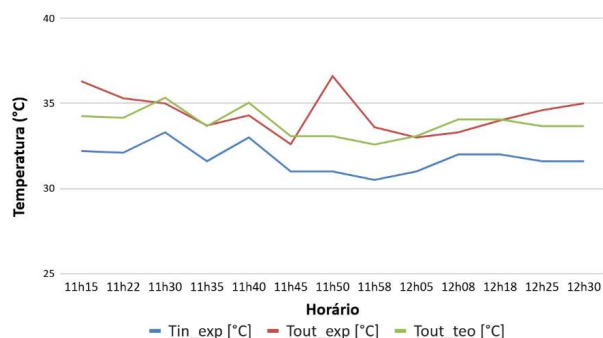
Na Figura 4 é apresentada a previsão do modelo matemático desenvolvido para a temperatura da água na saída do coletor ao longo do dia. Observa-se que a temperatura mantém-se praticamente constante durante a madrugada e início da manhã, em torno de 32 °C, começando a se elevar a partir das primeiras horas de incidência solar. O valor máximo previsto ocorre por volta do meio-dia, alcançando aproximadamente 34 °C, seguido de uma redução gradual até retornar ao patamar inicial no final da tarde e noite. Esse comportamento confirma a coerência do modelo em reproduzir a influência da variação horária da irradiância solar sobre o desempenho térmico do sistema, reforçando a validade dos resultados teóricos obtidos.

Resultados Experimentais

O ensaio experimental foi conduzido no dia 16/08/2025, sob condições de céu parcialmente nublado e temperatura ambiente de 28 °C. Os resultados coletados em campo mostraram que a temperatura da superfície do absorvedor apresentou variação entre 51,6 °C e 66,6 °C. Já a água de entrada manteve-se em uma faixa de 30,5 °C a 33,3 °C, enquanto a água de saída apresentou temperaturas entre 32,6 °C e 36,6 °C.

O gráfico a seguir mostra a evolução das temperaturas de entrada, saída e superfície do protótipo durante o teste prático.

Figura 5: Comparação entre os dados de temperatura da água de entrada no STS, temperatura de saída teórica e temperatura real de saída ao longo do tempo



É possível perceber na figura 5 um aumento médio da água de saída com relação a de entrada, no período entre 11:15 e 12:30 foi de 2 a 5 °C. Nota-se que apesar de o teste experimental ter disponibilizado um espaço amostral baixo de



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

variação das temperaturas com relação ao tempo, ficou claro que a variação de temperatura real seguiu o modelo previsto apresentando boa consistência e apontando para a validação do modelo teórico.

4 CONCLUSÕES

A comparação entre os resultados teóricos e experimentais demonstrou coerência no comportamento térmico do sistema. A potência útil calculada por duas metodologias (via coletor e via modelagem matemática) apresentou boa consistência, validando o modelo adotado. O dimensionamento do protótipo mostrou-se adequado para a função de pré-aquecimento da água de um eletrolisador tipo PEM, atingindo gradientes térmicos compatíveis com a faixa operacional pré-vista. Embora o ensaio experimental tenha ocorrido sob condições de céu parcialmente nublado, os valores obtidos confirmaram a tendência de aquecimento prevista, com ganhos médios de 2 a 5 °C entre a entrada e a saída. O sistema, mesmo em escala reduzida, apresentou bom desempenho dentro das condições ambientais de Fortaleza, evidenciando o coletor solar plano de baixo custo para aplicações de pré-aquecimento. A convergência entre a modelagem matemática e os dados experimentais reforça que ajustes futuros, como otimização de materiais, maior isolamento térmico e controle de vazão, podem ampliar ainda mais sua eficiência e aproximar o desempenho real do idealizado em projeto.

REFERÊNCIAS.

- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Revisão Global do Hidrogênio 2021**. Paris: Publicações da IEA, 2021.
- KALOGIROU, S. A. **O potencial das aplicações de calor de processo industrial solar**. Applied Energy, v. 76, n. 4, p. 337–361, 2003.
- LOUVET, Y.; FISCHER, S.; FURBO, S.; GIOVANETTI, F.; KÖHL, M. et al. **Diretriz para cálculos do custo nivelado do calor (LCoH) em aplicações solares térmicas**. IEA-SHC Task 54 Info Sheet A01, 2017.
- ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). **Estudo de caso – Hub de Hidrogênio Verde do Ceará / Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP)**. Paris: Programa OECD CEFIM, 2024.