



44° SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDR
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025
www.senafor.com

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E VALIDAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COLETORES SOLARES COM PLACAS ABSORVEDORAS DE CALOR FABRICADAS POR ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Gilson de March ⁽¹⁾
Marcos Antônio Jeremias Coelho ⁽²⁾
Lirio Schaeffer ⁽³⁾
Anderson Daleffe ⁽⁴⁾
Daniel Fritzen ⁽⁵⁾
Fábio André Lora ⁽⁶⁾
Max Gabriel Steiner ⁽⁷⁾
Ricardo José Alves de Sousa ⁽⁸⁾
Guilherme José de Antunes e Sousa ⁽⁹⁾

RESUMO

Este trabalho apresenta uma investigação experimental e técnica sobre a aplicação da estampagem incremental (*Incremental Sheet Forming* – ISF) na fabricação de placas absorvedoras para coletores solares, utilizando chapas de alumínio 1200 H14 com espessura de 1,5 mm. O objetivo principal é analisar a viabilidade da conformação direta de canais na superfície da chapa metálica, como alternativa à utilização de tubulações de cobre, visando a redução de custos e simplificação do processo produtivo, sem comprometer o desempenho térmico do sistema. Após a conformação, as placas absorvedoras foram integradas a sistemas de circulação forçada de água. A metodologia incluiu a realização de simulações térmicas por meio de software específico, seguidas de testes práticos de exposição solar em bancada experimental. A comparação entre os dados simulados e os obtidos experimentalmente permitem avaliar o comportamento térmico dos coletores em condições reais de operação. Os resultados demonstraram uma boa correlação entre os modelos teóricos e os dados experimentais, validando a aplicação da estampagem incremental na fabricação desses componentes funcionais. O estudo confirma o potencial da estampagem incremental como uma tecnologia viável e adaptável para a produção de soluções de energia renovável.

⁽¹⁾ Doutorando, UFRGS, E-mail: gilson.march@satc.edu.br

⁽²⁾ Prof. ME., UNISATC, E-mail: marcos.coelho@satc.edu.br

⁽³⁾ Prof. Dr., UFRGS, E-mail: schaeffer@ufrgs.br

⁽⁴⁾ Prof. Dr., UNISATC, E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

⁽⁵⁾ Prof. Dr., UNISATC, E-mail: daniel.fritzen@satc.edu.br

⁽⁶⁾ Prof. Dr., UFRB, E-mail: fabio.lora@ufrb.edu.br

⁽⁷⁾ Mestre, UNISATC, E-mail: max.steiner@satc.edu.br

⁽⁸⁾ Professor Catedrático, Universidade de Aveiro, E-mail: rsousa@ua.pt

⁽⁹⁾ Doutorando, Universidade de Aveiro. E-mail: gui.sousa@ua.pt

Palavras-chave: Coletor solar; Simulação térmica; Radiação solar.

1. INTRODUÇÃO

No contexto energético brasileiro, este se sobressai por apresentar um dos maiores potenciais para a geração de energia solar, em função da elevada incidência de radiação global média ao longo de seu território [1]; [2]. Aproximadamente um quarto da eletricidade consumida em residências do país é destinada ao aquecimento de água, o que evidencia a relevância de soluções térmicas mais sustentáveis e economicamente viáveis, como a utilização de coletores solares planos [3]; [4]; [5].

A energia solar térmica desempenha um papel importante; os coletores solares são dispositivos que capturam a radiação solar e a convertem em calor. Segundo o Atlas da Eficiência Energética Brasil em 2021 [6], em 2020 a área acumulada de coletores instalados para aquecimento solar no país alcançou aproximadamente 19,2 milhões de m², com quase 70% desse total pertencente ao setor residencial. O relatório também destaca que a adoção desses sistemas contribui para diminuir o consumo de eletricidade, reduzir a demanda de pico e mitigar perdas técnicas no sistema elétrico [6]; [7].

A crescente demanda por fontes sustentáveis de energia tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes no aproveitamento da energia solar. Os coletores solares planos são amplamente utilizados para o aquecimento de água, sendo a eficiência térmica um dos principais parâmetros para mensurar seu desempenho. A técnica de estampagem incremental tem sido aplicada na fabricação das placas absorvedoras desses coletores, permitindo a conformação de formas complexas que aumentam a área de contato com o fluido térmico e potencialmente melhoram a transferência de calor [8]; [9].

O coletor solar é composto não apenas pela placa absorvedora, conhecida como corpo negro, mas também por outros elementos que garantem proteção térmica e mecânica ao sistema. Essa placa é instalada dentro de uma estrutura que oferece resistência mecânica e isolamento térmico, com o objetivo de maximizar o calor transmitido à água que circula pela serpentina. O sistema completo é constituído pelo coletor solar e pelo mecanismo de circulação da água, no qual um reservatório é posicionado próximo ao coletor, com conexões por mangueiras para permitir a circulação do fluido térmico [10]; [11]; [12]; [13]. Conforme apontam diversos autores [14]; [15], os coletores solares planos constituem a tecnologia mais utilizada para o aquecimento de água.

A eficiência térmica dos coletores solares é um parâmetro fundamental para avaliar seu desempenho na conversão da radiação solar em energia térmica utilizável. Coletores solares com placas absorvedoras otimizadas permitem uma maior captação e retenção de calor, o que aumenta significativamente a eficiência do sistema. A fabricação dessas placas por técnicas avançadas, como a estampagem incremental, tem ganhado destaque por proporcionar flexibilidade no design e melhorias na eficiência térmica dos coletores solares planos [16]; [17].

Além dos métodos experimentais tradicionais, a simulação da eficiência térmica dos coletores solares tornou-se uma ferramenta essencial na validação e otimização dos designs dos sistemas. Por meio de modelos computacionais, é possível analisar detalhadamente a transferência de calor e o comportamento térmico das placas absorvedoras sob diferentes condições de operação, o que contribui para a melhoria do desempenho dos coletores e para a previsão precisa de sua eficiência. Em particular, simulações permitem avaliar efeitos de variáveis como fluxo de fluido, irradiância e

propriedades materiais, proporcionando uma compreensão abrangente do fenômeno térmico e auxiliando no desenvolvimento de coletores mais eficientes e econômicos [18]; [19]; [20].

Deste modo, este trabalho visa avaliar a viabilidade técnica, térmica e produtiva da aplicação do processo de estampagem incremental (ISF) na fabricação de placas absorvedoras para coletores solares, integrando análises experimentais e simulações computacionais térmicas, com o intuito de verificar o desempenho dos coletores em condições reais de operação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os detalhes do trabalho realizado estão descritos nesta seção.

2.1 PLACA COLETOR SOLAR PLANO

O coletor solar foi projetado a partir da combinação de duas chapas com área de 0,0784m² cada, sendo uma plana e outra conformada por meio da estampagem incremental. Os canais de circulação da água foram elaborados com geometrias em formato de meia-lua, possibilitando a investigação da influência da seção transversal sobre o desempenho térmico. Na Figura 1 apresentada a chapa conformada, da estampagem incremental.



Figura 1: Estratégias de fabricação do coletor solar.

O coletor solar foi projetado a partir da combinação de duas chapas com área de 0,0784m² cada, sendo uma plana e outra conformada por meio da estampagem incremental. Os canais de circulação da água foram elaborados com diferentes geometrias em formato de meia-lua, possibilitando a investigação da influência da seção transversal sobre o desempenho térmico. Na Figura 2 estão apresentadas as chapas conformadas, evidenciando diferentes configurações de estampagem incremental, com três e cinco canais retos, com diferentes estratégias do tipo de contorno e central do canal, com alturas de 8 mm e 10 mm, respectivamente.

Os parâmetros empregados na máquina para a estampagem incremental, incluindo os incrementos e o uso de ferramenta semiesférica, com profundidade total de 10 mm, estão apresentados na Tabela 1.

Descrição	Valor
Incremento Vertical (Δz)	0,5 mm
Velocidade de Avanço (f)	1.000 mm/min
Rotação da ferramenta (S)	Livre

Tabela 1: Parâmetro estampagem incremental.

A placa absorvedora tem a função de captar a radiação solar e transferi-la ao fluido

térmico na forma de calor. Trata-se de uma chapa plana revestida com tinta preta, o que potencializa a absorção da radiação solar. Para sua fabricação, foi empregado alumínio da liga 1200 H14, em consonância com estudos anteriores. [21].

A Figura 2 exemplifica o formato da placa para absorção da radiação solar.



Figura 2: Modelo de Coletor Solar fabricado

2.2 MONTAGEM COLETOR SOLAR

O coletor solar foi montado em uma caixa de madeira isolada termicamente, dimensionada para acomodar duas placas absorvedoras, integradas a uma tubulação de 10 mm e com sensores posicionados entre as placas, conforme figura 3. Na parte superior da estrutura, instalou-se um vidro temperado de baixo teor de ferro, com 4 mm de espessura, visando aumentar a transmissão da radiação solar e proporcionar proteção mecânica ao sistema. [22]; [23]; [24].



Figura 3: montagem externa do coletor solar

2.3 SIMULAÇÃO

Para a etapa de simulação numérica, utilizou-se o software *SolidWorks Flow Simulation* 2025, baseado no método dos volumes finitos e totalmente integrado ao ambiente CAD. O modelo numérico replicou o protótipo experimental do coletor solar plano em alumínio, com canais integrados para circulação de água. Foi considerado o regime de transferência de calor conjugada (CHT), englobando condução no domínio sólido e convecção no domínio fluido.

As equações de governo resolvidas foram as de Navier-Stokes médias de Reynolds (RANS) em regime permanente, associadas à equação da energia. A turbulência foi modelada pelo esquema $k-\epsilon$ com funções de parede generalizadas. As

propriedades ópticas da superfície exposta foram definidas com absorvidade solar de 0,95 e emissividade térmica de 0,90. Para o tratamento da radiação, aplicou-se o modelo *Discrete Transfer Radiation Model* (DTRM), considerando condições ambientais de 54 °C, 65% de umidade relativa e convecção equivalente a 7,14 m/s.

O fluido de trabalho foi água líquida, com vazão de entrada de 0,85 L/min ($1,416 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$) a uma temperatura de 24,4 °C, enquanto a saída foi fixada em pressão manométrica de 0 Pa. A malha computacional foi estruturada em grade cartesiana com refinamento global nível 4 e controle local nas paredes da placa absorvedora e nos canais. Foram utilizadas cinco camadas prismáticas para melhor resolução da região de contorno. O modelo computacional, com 259.113 células no total (127.564 no domínio do fluido e 131.549 no sólido), permitiu prever o campo térmico na placa absorvedora e a evolução da temperatura da água.

Para reduzir a complexidade computacional, algumas simplificações foram adotadas: as conexões hidráulicas (joelhos, curvas e tubos de ligação entre passes) não foram modeladas individualmente, assumindo-se que não haveria perdas adicionais ou trocas de calor significativas nesses trechos. Esse tratamento foi considerado adequado, visto que o foco principal da análise foi o desempenho térmico global do coletor.

O critério de convergência adotado foi uma variação absoluta máxima de 0,01 K na temperatura média de saída, atingido após cerca de 63 iterações. Assim, o modelo CFD permitiu prever o campo térmico na placa absorvedora e a evolução da temperatura da água, servindo de base para comparação com os resultados experimentais.



Figura 4: Montagem na simulação das placas do coletor solar.

2.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO E CONTROLE

O sistema experimental contou com um arranjo de monitoramento e controle projetado para avaliar o desempenho térmico do conjunto de aquecimento, o diagrama de bloco das conexões é apresentado na Figura 4. A circulação do fluido térmico foi realizada por meio de uma bomba centrífuga de corrente contínua de 24 Vcc, com vazão máxima de 2 L/min, alimentada por uma fonte de 220 Vca/24 Vcc, garantindo estabilidade operacional durante os ensaios.

A medição da vazão foi obtida com um sensor do tipo YF-S201, que opera pelo efeito Hall e fornece pulsos proporcionais ao fluxo de água. O dispositivo foi conectado a uma placa de prototipagem Arduino Nano, responsável pelo processamento dos pulsos e pela conversão em valores de vazão instantânea, possibilitando o

monitoramento da taxa de recirculação do fluido no sistema.

As variáveis térmicas foram registradas por meio de quatro sensores de resistência de platina do tipo PT100, devidamente calibrados para assegurar rastreabilidade metrológica. Os pontos de aquisição foram definidos de forma a caracterizar o comportamento térmico em diferentes regiões do circuito: (i) temperatura interna da caixa de aquecimento, (ii) temperatura na entrada da água, (iii) temperatura intermediária entre os dois estágios do aquecedor e (iv) temperatura de saída.

A aquisição dos sinais foi realizada por um registrador de dados modelo *Fieldlogger* (Novus), configurado com taxa de amostragem de 1 Hz. O dispositivo realizou o armazenamento contínuo em cartão SD, permitindo posterior análise temporal dos dados. Além disso, recursos internos de filtragem digital e linearização do sinal contribuíram para aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

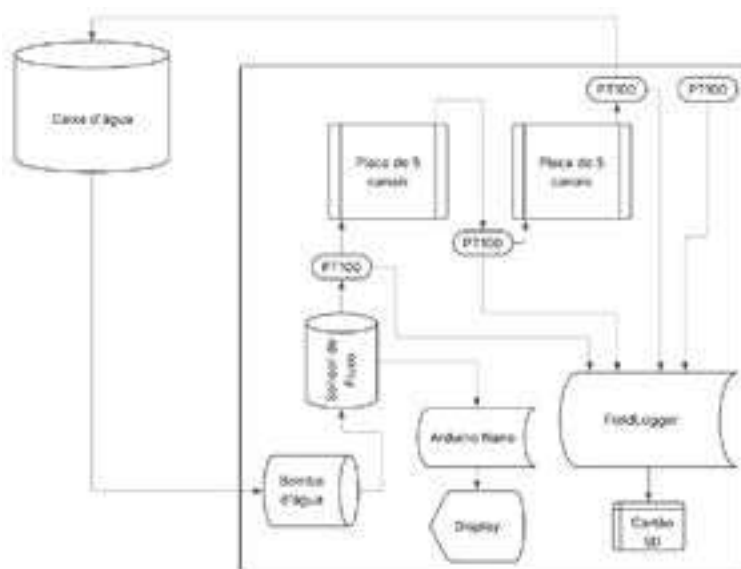


Figura 4: Esquemático de conexão do sistema de aquisição e controle.

Essa configuração possibilitou a obtenção de dados consistentes para a avaliação da eficiência térmica do sistema, integrando medições de vazão e temperatura em pontos críticos do processo, de modo a fornecer subsídios técnicos para a análise do desempenho energético e da eficácia da configuração em dois estágios

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e discute os resultados de simulação e os dados de campo obtidos.

3.1 SIMULAÇÃO

Os resultados numéricos foram validados por meio da comparação com dados experimentais obtidos no dia 18 de setembro de 2025 às 12h45, período selecionado por corresponder ao pico de irradiação solar local ($\sim 977 \text{ W/m}^2$). Essa condição crítica foi intencionalmente escolhida para testar a robustez do modelo, uma vez que pequenas variações nas condições de contorno ou propriedades ópticas tendem a ter maior impacto sob alta carga térmica.

Nos ensaios experimentais, a temperatura da água apresentou um aumento total de $\Delta T = 2,30 \text{ K}$, passando de $24,44 \text{ }^\circ\text{C}$ na entrada para $26,74 \text{ }^\circ\text{C}$ na saída. Já no modelo CFD, a temperatura de entrada foi definida como $24,44 \text{ }^\circ\text{C}$. Após a primeira passagem do canal serpentina, a saída numérica foi de $25,49 \text{ }^\circ\text{C}$, resultando em $\Delta T_1 = 1,05 \text{ K}$.

Essa condição foi utilizada como entrada da segunda passagem, cuja saída foi de 26,46 °C, totalizando $\Delta T = 2,04$ K.

Assim, o modelo subestimou em 0,26 K a elevação de temperatura observada experimentalmente, o que corresponde a um erro relativo de 11,3 %. A diferença absoluta entre a temperatura de saída numérica (26,46 °C) e a experimental (26,74 °C) foi de apenas 0,28 K, valor compatível com a soma das incertezas dos sensores de temperatura ($\pm 0,1-0,2$ K) e dos erros numéricos inerentes ao modelo.

Caso	Entrada T (°C)	Saída T (°C)	ΔT (K)	Desvio (K)	Erro Relativo (%)
Experimental	24,44	26,74	2,30		
CFD – Passe 1	24,44	25,49	1,05		
CFD – Passe 2 (total)	25,49	26,46	0,97 (2,02)	-0,26	11.3

Tabela 2 - Comparação entre resultados experimentais e numéricos.

Essa proximidade entre os resultados reforça a consistência e aplicabilidade do modelo CFD para representar o comportamento térmico global do coletor solar, mesmo sob condições extremas de operação. A Figura 5 apresenta o resultado da simulação numérica, destacando o campo de temperatura na superfície da placa absorvedora (parte superior) e as trajetórias de escoamento do fluido (parte inferior).

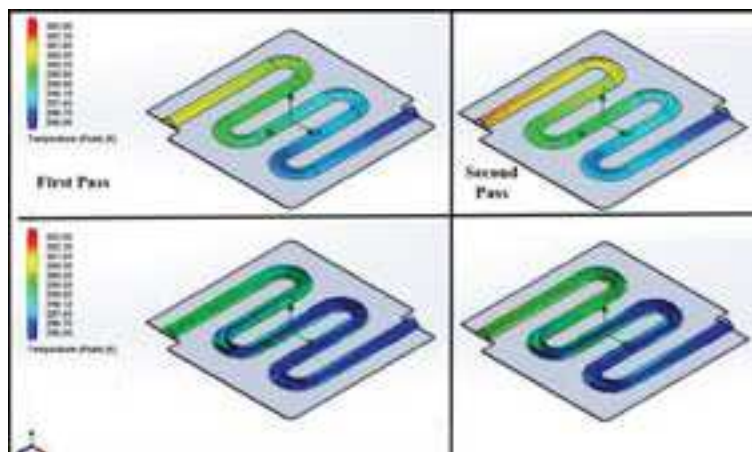


Figura 5 - Resultados numéricos de simulações CFD (gráfico de superfície na metade superior e trajetória de fluxo na metade inferior).

3.2 COLETA DE DADOS EM CAMPO

A coleta de dados experimentais em campo foi realizada no campus do Centro Universitário UniSATC em estrutura de madeira confeccionada em madeira para acomodação do coletor solar com ângulo de 29 ° em relação ao solo e com direção para o ponto cardeal norte. Como fonte de água foi utilizada uma caixa d'água de 310 L com altura da saída de líquido sendo a mesma da entrada de água no coletor térmico e a saída retornando à caixa d'água. O local e instalação do experimento é apresentado na Figura 6.



Figura 6: Local e instalação do coletor solar.

A coleta de dados ocorreu nos dias 18 e 19 do mês de setembro de 2025. Durante o dia 18/09 a coleta de dados ocorreu das 10 horas da manhã às 17 horas. Os dados coletados da temperatura interna da caixa do coletor térmico, temperatura da água antes da primeira placa coletora, a temperatura entre as duas placas coletores e a temperatura de saída do coletor térmico são apresentadas na Figura 7.

Durante o período maior diferença de temperatura entre a entrada e saída foi de $\Delta T = 3,6$ K, entre as a primeira placa e entre as placas coletores de $\Delta T_1 = 1,9$ K e entre as placas coletores e a saída de $\Delta T_2 = 1,8$ K. Durante o período de 12:45 e 13:00 houve uma abertura no vidro do coletor térmico para verificação do funcionamento, gerando a queda da temperatura vista na figura após o 44.000º segundo.

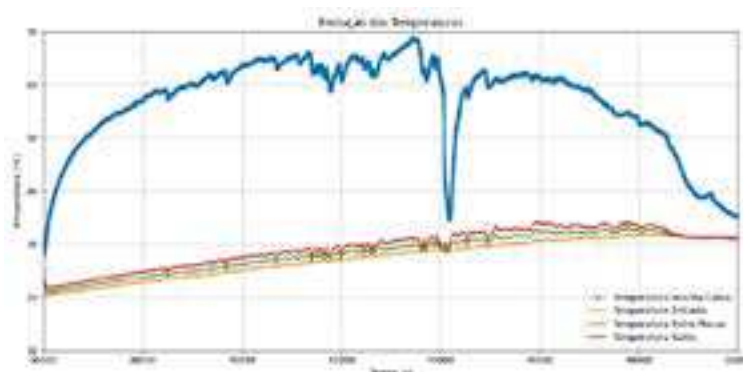


Figura 7: Coleta de dados da temperatura no coletor térmico no dia 18/09/2025

Para fim de comparação com a geração do coletor térmico, na Figura 8 é apresentado o dado de irradiação solar no mesmo período de tempo no dia 18/09/2025.

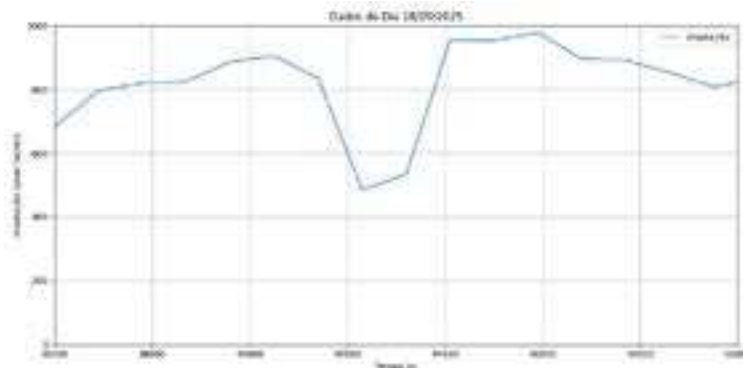


Figura 8: Irradiação solar no campus UniSATC no dia 18/09/2025.

Durante o dia 19/09 a coleta de dados ocorreu das 8:30 horas da manhã às 16:00. Os dados coletados têm a mesma configuração anterior (Figura 9).

Durante o período maior diferença de temperatura entre a entrada e saída foi de $\Delta T = 4,29 \text{ }^\circ\text{C}$, entre as a primeira placa e entre as placas coletores de $\Delta T_1 = 2,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e entre as placas coletores e a saída de $\Delta T_2 = 2,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Durante o período de 46.000 e 47.500 houve discrepâncias de dados de geração não identificados, os quais foram retirados da análise de dados.

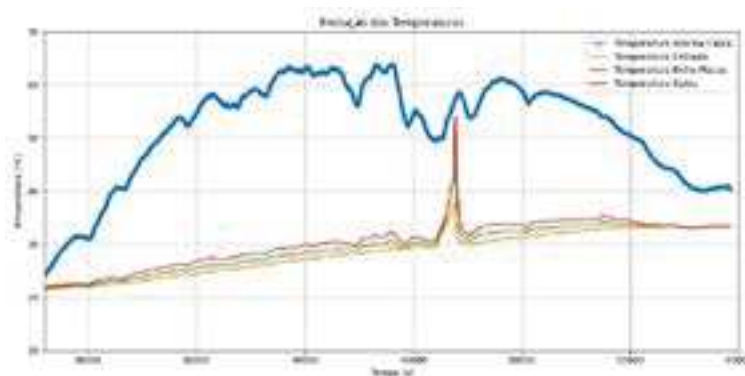


Figura 9: Coleta de dados da temperatura no coletor térmico no dia 19/09/2025

Para fim de comparação com a geração do coletor térmico, na Figura 10 é apresentado o dado de irradiação solar no mesmo período de tempo do dia 19/09/2025.

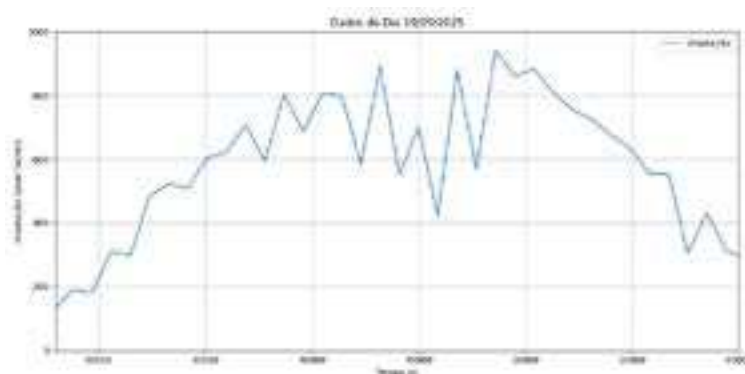


Figura 10: Irradiação solar no campus UniSATC no dia 19/09/2025.

3.3 DISCUSSÕES

A análise conjunta dos resultados de simulação e experimentais mostra uma boa correlação entre o modelo numérico e os ensaios de campo para o coletor solar fabricado por estampagem incremental. A diferença máxima observada entre os valores de saída foi de 0,28 K, evidenciando que o modelo CFD simplificado, ainda que desconsiderando as perdas locais em conexões e curvas, foi capaz de representar adequadamente o desempenho térmico global do sistema.

Nos testes em campo, registrou-se um aumento de temperatura entre $3,6 \text{ }^\circ\text{C}$ e $4,29 \text{ }^\circ\text{C}$ entre a entrada e a saída do coletor, valores superiores ao observado na condição isolada de comparação com a simulação ($2,30 \text{ }^\circ\text{C}$). Essa diferença é atribuída a fatores não modelados numericamente, como a estratificação térmica do ar na caixa, a inércia térmica dos materiais, perdas radiativas adicionais nas paredes laterais e variações transitórias da irradiação solar. Ainda assim, a tendência de elevação da temperatura e o perfil térmico medido nos pontos de monitoramento confirmam o comportamento previsto pelo modelo.

Outro ponto relevante é que a simulação CFD foi conduzida sob a condição de pico de irradiação (977 W/m^2), o que representa o cenário mais crítico de operação. Nessas condições, pequenas discrepâncias de propriedades ópticas do vidro ou da

pintura da placa absorvedora impactam de forma ampliada a resposta térmica. Mesmo assim, o erro relativo permaneceu inferior a 12%, valor considerado aceitável em estudos experimentais de coletores solares.

Os resultados também reforçam a viabilidade técnica do uso da estampagem incremental como processo de fabricação das placas absorvedoras. A geometria conformada dos canais, além de simplificar a montagem e reduzir custos em relação às tubulações de cobre, mostrou-se capaz de assegurar uma transferência de calor eficiente. Tanto a simulação quanto os ensaios indicaram que a configuração em múltiplos canais proporcionou ganhos de desempenho, confirmando o potencial da tecnologia para aplicações em escala maior.

Portanto, pode-se afirmar que a integração entre simulação CFD e validação experimental foi fundamental para demonstrar a confiabilidade do modelo e a eficácia do conceito proposto. A concordância entre os resultados respalda a continuidade do desenvolvimento do sistema, incluindo estudos de otimização geométrica dos canais, avaliação de novos materiais e análises de desempenho em condições climáticas distintas.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica da aplicação da estampagem incremental na fabricação de placas absorvedoras para coletores solares planos. A utilização de chapas de alumínio conformadas diretamente com canais de circulação mostrou-se uma alternativa promissora às tubulações de cobre tradicionais, reduzindo custos de produção e simplificando a montagem sem comprometer a eficiência térmica do sistema.

A integração entre simulações CFD e ensaios experimentais confirmou a consistência dos resultados. O modelo numérico reproduziu com boa aproximação o comportamento térmico global do coletor, apresentando diferença máxima de apenas 0,28 K em relação aos dados de campo, mesmo sob condições de irradiação solar máxima. Essa correlação evidencia a confiabilidade da abordagem adotada e valida o uso da simulação como ferramenta de apoio no projeto e otimização de coletores solares.

Os ensaios em campo reforçaram o potencial do sistema, registrando aumentos de temperatura superiores a 4 °C entre a entrada e a saída da água, o que comprova a eficiência da transferência de calor nas placas conformadas. Esses resultados apontam para a viabilidade de implementação em aplicações residenciais e comerciais, contribuindo para ampliar o uso de soluções renováveis no aquecimento de água.

Conclui-se, portanto, que o emprego da estampagem incremental para a fabricação de coletores solares planos não apenas é tecnicamente viável, mas também abre perspectivas para otimizações futuras, como a exploração de diferentes geometrias de canais, o uso de materiais alternativos e a adaptação a diferentes condições climáticas. Dessa forma, o estudo reforça o papel da manufatura inovadora no desenvolvimento de tecnologias acessíveis e sustentáveis para o setor de energia solar térmica.

AGRADECIMENTO

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina (FAPESC), Edital 27/2021 | TR 2021TR001824, pelo apoio financeiro que tornou possível esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] PEREIRA R. C., SHIOTA R. T. S., MELLO S. F. M., ASSIS V. J., J. R. BARTOLI, **Eficiência térmica de coletores solares de baixo custo - CSBC**, Novembro 2006.
- [2] INPE I. N. d. P. E., **Atlas brasileiro de energia solar**, 2.ed ed., São José dos Campos - SP, 2017.
- [3] **Energia solar no Brasil: resumo do mercado em 2025!**. Órigo Energia. Janeiro de 2025. Disponível em: <https://origoenergia.com.br/blog/energia/energia-solar-no-brasil/>
- [4] DUFFIE J. A., BECKMAN W. A., **Solar Engineering**, 4th Edition. ed., I. H. N. J. John Wiley & Sons, Ed., 2013.
- [5] TAVARES L. D. O., DIMBARRE V. V., BIGLIA F. M., CRUZ F. B. C., SANTOS P. H. D. D., ALVES T. A., **Análise Experimental do Desempenho Térmico de um Coletor Solar do Tipo Placa Plana**, vol. 13º, Conbrepro - Congresso brasileiro de Engenharia de Produção, 2023.
- [6] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, Atlas da Eficiência Energética Brasil/2021 - Relatório de indicadores. Acessado em outubro de 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2021>
- [7] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, Ações Norteadoras para o avanço da Eficiência Energética no Brasil – dezembro de 2024. Acessado em outubro de 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-e-epe-apresentaram-estudos-com-acoes-norteadoras-para-promover-o-avanco-da-eficiencia-energetica-no-brasil/copy3_of_CadernoAesNorteadorasdeEficinciaEnergticanoBrasil_siteVF.pdf
- [8] MARCH, G.; PINHEIRO, W. C.; FRITZEN, D.; DALEFFE. A.; CASTELAN, J. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapas de Alumínio para uso em Aquecedor Solar**. Revista Vincii – Periódico Científico da UniSATC, v. 8, n. 2, p. 446-468, jul./dez., 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.70185/2525-6025.2023.v8.339>
- [9] ARRUDA R. P. **Estampagem incremental na Conformação de Chapas para Fabricação de Coletores Solares Planos**. UFRGS - Tese de Doutorado. Porto Alegre 2010
- [10] TAVARES, L. O.; DIMBARRE, V. V.; BIGLIA, F. M.; CRUZ, F. B. C.; SANTOS, P. H. D. D.; ALVES, T. A. **Análise Experimental do Desempenho Térmico de um Coletor Solar do Tipo Placa Plana**, vol. 13º, Conbrepro - Congresso brasileiro de Engenharia de Produção, 2023.
- [11] LEITAO, J. M. D. M.; MACAGNAN, M. H.; ROCHA, T. L. A. C. **Estudo de Materiais Poliméricos para a Aplicação em Coletores Solares Planos**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS , Gramado- RS, 2018.
- [12] NETO, M. C. M.; GOMES, I. R. B.; SOUZA, L. G. M.; JUNIOR, Z. J. S.; OLIVEIRA, E. V. **Aplicação de Materiais Alternativos para o uso da Energia Solar**, Holos, vol. 04, pp. 212-223, 2014.
- [13] B. NORTON, **Solar Energy Thermal Technology**, 1992, p. 279.
- [14] NETO, J.H.M.; MOREIRA, S.; DOMINGOS, S.F.; MAIO, V. R. S.; PEDREIRA, S. M. **Análise técnica e econômica de coletores solares de baixo custo e convencionais utilizados para aquecimento de água de banho**. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES - Florianópolis, 18 a 21 de novembro de 2008.
- [15] GUERRA, M. I. S.; VARELLA, F. K. O. M. Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo na cidade de Mossoró (RN). HOLOS, Ano 30, Vol. 4. Disponível em: DOI: [10.15628/holos.2014.1266](https://doi.org/10.15628/holos.2014.1266)
- [16] LORA, F. A.; BRITO, J. M.; FRITZEN, D. **Estudo do processo de estampagem incremental para aplicação na fabricação de placas absorvedoras de calor**. 39th SENAFOR. Outubro de 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/336513672_Estudo_do_processo_de_estampagem_incremental_para_aplicacao_na_fabricacao_de_placas_absorvedoras_de_calor
- [17] LORA, F. A.; SOUZA, N.; FIGUEIREDO, É. G.; DAMM, D. D.; ALMEIDA, K. F.; PEREIRA, J. S. **Estudo comparativo de configurações para um coletor solar experimental**. Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales. São José dos Pinhais, v.16, n.6, p. 3401-3414, 2023. Disponível em: DOI: 10.55905/revconv.16n.6-021
- [18] ARA, P, J. S.; SOWMY, D. S. **Análise Térmica de Coletor Solar Plano via Simulação CFD validada Experimentalmente por Teste em Simulador Solar**. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Fortaleza, 01 a 05 de junho de 2020.

- [19] CARVALHO, F. R.; SIONEK, M. C. **Análise da Eficiência de um Coletor Solar Plano**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- [20] FREITAS, D. L. A. **Caracterização Numérica e experimental de um Coletor Solar de Placa Plana**. Dissertação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – Paraíba, abril de 2017.
- [21] MAIA, J. M. B.; PEREIRA, B. G. ; LORA, F. A. . **Materiais como alternativa para uso em Coletores Solares / Materials as an alternative for use in Solar Collectors**. Brazilian Applied Science Review, v. 4, p. 2895-2903, 2020.
- [22] PILKINGTON, for Solar Applications. Acessado em setembro de 2025. Disponível em: https://www.pilkington.com/en/us/products/product-categories/solar-energy/pilkington-optiwhite-for-solar-applications?utm_source=chatgpt.com#
- [23] [KHOUKHI](#),M.; [MARUYAMA](#), S. **Theoretical approach of a flat plate solar collector with clear and low-iron glass covers taking into account the spectral absorption and emission within glass covers layer**. Renewable Energy, v. 30, edição 8, July 2005, p. 1177-1194. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.014>
- [24] [KHOUKHI](#),M.; [MARUYAMA](#), S.; SAKAI, S. **Non-gray calculation of plate solar collector with low iron glazing taking into account the absorption and emission with a glass cover**. Desalination v. 209, edição 1–3, 30 April 2007, Pages 156-162. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.04.025>