

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Desempenho energético de um sistema fotovoltaico-térmico (FVT) residencial em condições reais de operação

AUTORES:

Rafael Pereira da Cruz
Bruna de Oliveira Busson
Rafael Wiliam Faleiros
Júlio César Passos

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Santa Catarina

DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO-TÉRMICO (FVT) RESIDENCIAL EM CONDIÇÕES REAIS DE OPERAÇÃO

Resumo

A queima de combustíveis fósseis para a obtenção de energia é responsável, em muitos países, pela maior parte da emissão dos gases de efeito estufa. No entanto, a participação das fontes de energias renováveis tem se tornado mais significativa na matriz energética global, com destaque para a energia solar, que pode fornecer tanto energia elétrica quanto térmica. Os módulos fotovoltaicos (FV) comerciais apresentam eficiência de conversão na faixa de 5%-25%, indicando que uma parcela considerável da radiação solar é convertida em energia térmica, aumentando a temperatura de operação das células FV. Um módulo FV é convertido em um módulo fotovoltaico-térmico (FVT) fixando um trocador de calor (TC) de polipropileno (PP) em sua superfície posterior, maximizando o ganho energético global. Dessa forma, este estudo propõe a avaliação do desempenho energético de um sistema FVT residencial no suprimento das demandas típicas de um ambiente doméstico em condições reais de operação. O sistema avaliado possui três módulos FVT conectados em paralelo, instalados em uma casa com quatro residentes localizada em Florianópolis. O perfil de consumo está associado a dois chuveiros elétricos e uma torneira na cozinha. Foram avaliadas a geração elétrica e térmica do sistema FVT residencial sob a influência da irradiação solar, bem como a necessidade de energia adicional para o aquecimento extra da água até a temperatura de consumo. Os resultados ao longo dos dias analisados demonstraram que, para níveis de irradiação solar superiores a 4,0 kWh/m²/dia, o sistema FVT conseguiu atender até 66,3% da demanda de água quente da residência. Para estes dias, a utilização complementar de energia para elevar a temperatura de saída da água do sistema FVT até a de consumo é menor, evidenciando o potencial do sistema FVT residencial para suprir a demanda por energia térmica da residência. A energia térmica produzida pelos módulos FVT, evidenciaram o maior aproveitamento global da energia solar. Verificou-se também que o acúmulo de energia térmica no reservatório é um fator relevante na viabilidade de sistemas FVT residenciais, pois a água quente armazenada está disponível para uso mesmo em dias e horários em que o sistema FVT é pouco requisitado.

Palavras-chave: Sistema FVT, Residencial, Desempenho energético.

Abstract

The burning of fossil fuels to obtain energy is responsible, in many countries, for the majority of greenhouse gas emissions. However, the participation of renewable energy sources has become more significant in the global energy matrix, with emphasis on solar energy, which can provide both electrical and thermal energy. Commercial photovoltaic (PV) modules have conversion efficiencies in the range of 5%-25%, indicating that a considerable portion of solar radiation is converted into thermal energy, increasing the operating temperature of PV cells. A PV module is converted into a photovoltaic-thermal module (PVT) by fixing a polypropylene (PP) heat exchanger (TC) on its back surface, maximizing the overall energy gain. Therefore, this study proposes the evaluation of the energy performance of a residential PVT system in meeting the typical demands of a domestic environment in real operating conditions. The evaluated system has three PVT modules connected in parallel, installed in a house with four residents located in Florianópolis. The consumption profile is associated with two electric showers and a tap in the kitchen. The electrical and thermal generation of the residential PVT system under the influence of solar irradiation was evaluated, as well as the need for additional energy to heat the water

up to drinking temperature. The results over the analyzed days demonstrated that, for solar irradiation levels above 4.0 kWh/m²/day, the PVT system was able to meet up to 66.3% of the residence's hot water demand. For these days, the additional use of energy to raise the water outlet temperature from the PVT system to the consumption temperature is lower, highlighting the potential of the residential PVT system to meet the residence's demand for thermal energy. The thermal energy produced by PVT modules demonstrated the greatest global use of solar energy. It was also found that the accumulation of thermal energy in the reservoir is a relevant factor in the viability of residential PVT systems, as the stored hot water is available for use even on days and times when the PVT system is rarely required.

Keywords: PVT System, Residential, Energy Performance.

Introdução

As alterações climáticas e a poluição atmosférica são propulsoras da transição energética em todo o mundo (GIELEN *et al.*, 2019). A matriz energética mundial por muito tempo foi direcionada para o consumo de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural (SANTOS, 2023). Entretanto, a queima destes combustíveis para a obtenção de eletricidade é responsável pela maior fonte de emissão dos gases de efeito estufa (GEE) a nível global (BOSU *et al.*, 2023). O setor residencial e atividades relacionadas à construção foram responsáveis, em 2023, por quase 36% do consumo final de energia no mundo (BOSU *et al.*, 2023; IEA, 2023). Em contrapartida, foram responsáveis por 15% das emissões diretas de CO₂, considerando também as emissões indiretas por eletricidade e calor utilizadas nos edifícios, esse valor chega a 39% (IEA, 2023).

Frente ao forte impulso para uma maior participação das energias renováveis na matriz energética global, é interessante destacar o potencial e contribuição da energia solar, que pode fornecer tanto energia elétrica por meio de painéis FV bem como energia térmica por meio de coletores solares térmicos (ST) (OLIVEIRA; GUERRA; VIEIRA, 2019). Os sistemas FV convencionais, possuem uma eficiência de conversão entre 5% e 25%, o que implica que uma parte da radiação que chega às células FV é diretamente convertida em eletricidade, enquanto outra parcela considerável da radiação solar é convertida em energia térmica, promovendo o aumento da temperatura de operação das células (TIWARI *et al.*, 2023; PINHO e GALDINO, 2014).

O calor útil disponível no módulo FV pode ser extraído, convertido e aplicado através de um sistema FVT resfriado a ar, água ou nanofluidos (ALMOATHAM *et al.*, 2024). Os sistemas FVT consistem basicamente em um módulo FV, no qual é fixado um trocador de calor (TC) na sua parte posterior, produzindo eletricidade e energia térmica simultaneamente, reduzindo a temperatura de operação da célula FV, aumentando a eficiência de conversão elétrica, minimizando a necessidade de espaço, além de reduzir o custo (CHAUHAN; TYAGI; ANAND, 2018). Somada a essas vantagens, tem-se a taxa global de conversão da energia solar mais elevada quando comparada ao rendimento dos sistemas FV e ST independentes (HERRANDO *et al.*, 2023).

O setor residencial caracteriza-se como um mercado promissor para substituição de combustíveis convencionais por tecnologia FVT que pode contribuir com o fornecimento de energia elétrica e térmica, apresentando uma excelente oportunidade para a descarbonização. Dessa forma, o principal objetivo deste estudo é avaliar o desempenho energético de um sistema FVT residencial com TC de polipropileno (PP) com 153 canais retangulares no suprimento das demandas típicas de um ambiente doméstico. O sistema FVT residencial possibilita o aproveitamento da energia térmica para

aquecer a água ao mesmo tempo em que este fluido arrefece o painel FVT, permitindo um aproveitamento mais eficiente da radiação solar.

Metodologia

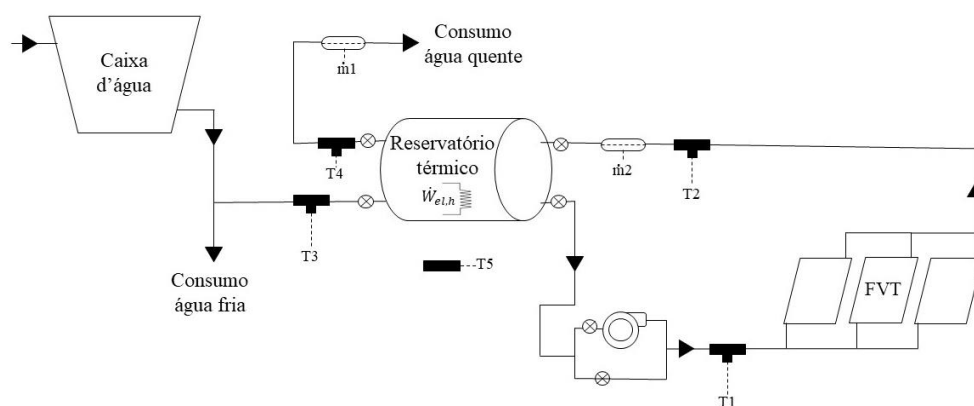
A bancada está instalada no telhado de uma residência habitada por quatro pessoas, localizada no bairro Armação, cuja posição geográfica é latitude de 27,752° S e longitude de 48,504° O. A Figura 1 mostra o sistema instalado composto por sete módulos FV e três módulos FVT (conjunto inferior esquerdo da Figura 1), dispostos lado a lado em dois arranjos. Os demais componentes do sistema FVT são mostrados na representação esquemática da Figura 2.

Figura 1 – Bancada FVT residencial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2 – Representação esquemática dos componentes que compõem a bancada FVT residencial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O desenho esquemático da Figura 2 mostra uma caixa d'água de 500 litros que armazenava água fria da rede comum de abastecimento, um reservatório térmico com 500 litros, responsável por armazenar água quente até que esta fosse utilizada pelos residentes, uma bomba que propulsionava água para os módulos FVT. Havia pontos de medição de temperatura e vazão para controle e monitoramento realizados nas entradas e saídas dos equipamentos e do sistema FVT. Esses pontos utilizavam sensores PT100 classe AA e sensores de vazão para aferição de temperatura e fluxo de água, respectivamente.

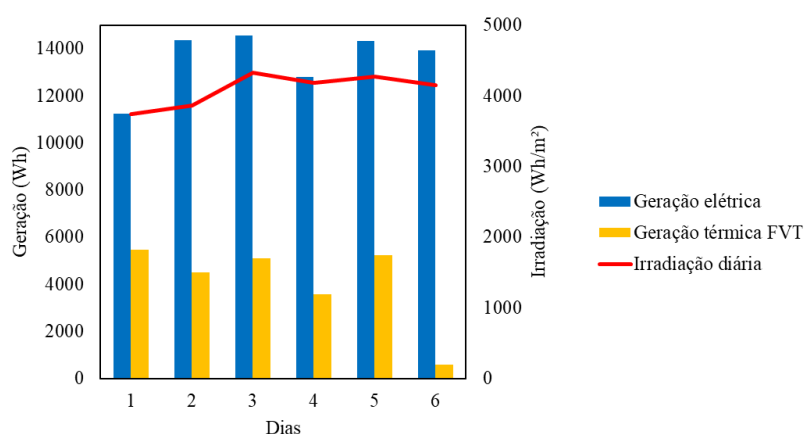
Água fria, cuja vazão foi registrada pelo sensor $\dot{m}_2$, vem da rede comum pela da caixa d'água e foi conduzida pela bomba para os TC de PP. Então, essa água arrefeceu os módulos FVT e, posteriormente, foi direcionada para o reservatório térmico, onde a água quente foi acumulada até o consumo, monitorado pelo sensor de vazão ($\dot{m}_1$). O consumo de água quente na bancada FVT residencial estava associado a dois chuveiros elétricos e uma torneira na cozinha.

A irradiação solar global horizontal medida por um piranômetro foi convertida para irradiação solar global inclinada a um ângulo de 14° utilizando o Modelo de Pérez (DUFFIE e BECKMANN, 2006). A energia advinda do sol foi confrontada com a produção elétrica aferida pelo inversor MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), com a geração de energia térmica, que depende da diferença entre as temperaturas de entrada e saída no sistema FVT (T_3 e T_4 da Figura 2, respectivamente) e de $\dot{m}_1$, e com a energia elétrica extra. Essa demanda por energia elétrica extra foi necessária para elevar a temperatura de saída do sistema FVT até a temperatura de consumo definida como 40°C .

Resultados e Discussão

O gráfico da Figura 3 apresenta a geração de energia elétrica e térmica ao longo dos dias analisados em função da irradiação solar.

Figura 3 – Geração de energia elétrica.



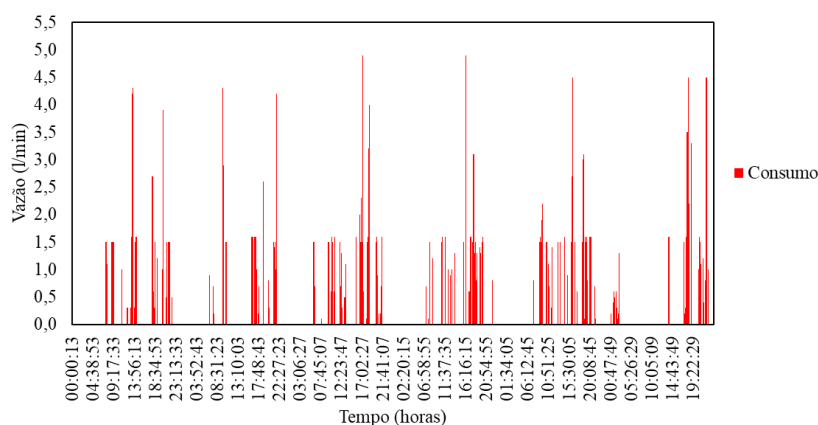
Fonte: Elaborado pelo autor.

A geração de energia elétrica está diretamente relacionada à irradiação solar que atinge a superfície superior dos módulos FV e FVT. Assim, é esperado que o dia com maiores níveis de irradiação solar seja também aquele com a maior produção de eletricidade, como pode ser visto na Figura 3. A média para os dias analisados foi de 13531 Wh. Por sua vez, a geração térmica FVT, que está relacionada à energia térmica produzida pelos módulos FVT, mostram um maior aproveitamento da energia solar disponível, com valor médio para os dias analisados de 4076 Wh. Assim, há um aumento na produção global de energia, atestando uma das principais vantagens de sistemas FVT.

O perfil de consumo dos moradores da residência apresenta um padrão para algumas horas ao longo dos dias analisados, é possível observar na Figura 4 que a maior demanda compreende aos horários do final da tarde e as primeiras horas da noite. Esses períodos de tempo ocorrem quando a irradiância solar é baixa ou mesmo nula. Dessa forma, a função do reservatório térmico mostra-se ainda

mais relevante, pois acumula a água quente proveniente dos módulos FVT para posterior uso de acordo com a demanda dos moradores, já que são operações preponderantemente independentes.

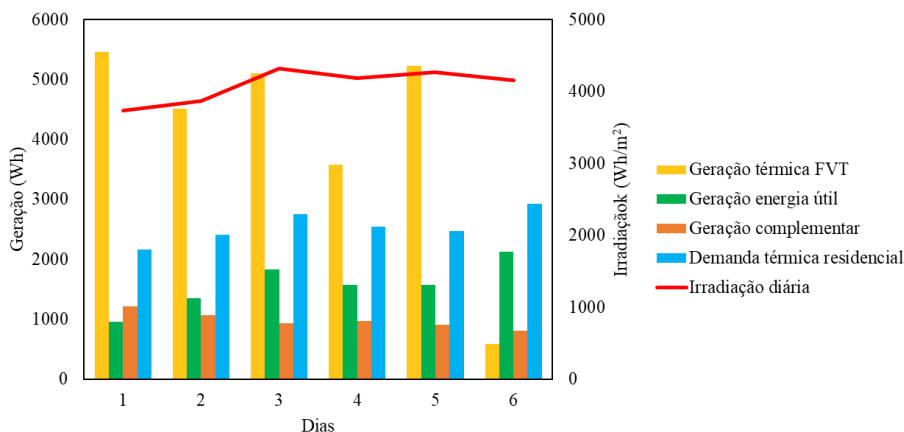
Figura 4 – Perfil de consumo residencial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5 apresenta os resultados associados ao desempenho térmico do sistema FVT residencial, para todos os dias analisados, em função do nível de irradiação solar diária. Observa-se que o conjunto de três módulos FVT comparado ao consumo real da residência, conseguiu poupar, ao todo, 9400 Wh de energia elétrica para elevar a temperatura até a temperatura de consumo desejada de 40°C, conseguindo atender até 61,5% da demanda de água quente da residência. Para os dias 3, 4, 5 e 6, com níveis de irradiação solar superiores a 4,0 kWh/m²/dia, o sistema FVT conseguiu atender até 66,3% da demanda de água quente.

Figura 5 – Desempenho térmico do sistema FVT residencial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Caso não houvesse o sistema FVT, a energia necessária para aquecer a água dos chuveiros e da torneira adviria da eletricidade produzida pelos módulos FV. Portanto, parte da energia elétrica produzida pelos módulos FV, que poderia ser fornecida para demais equipamentos da residência, seria

utilizada no acionamento da resistência elétrica dos chuveiros e da torneira para aquecimento de água. Termodinamicamente, significaria a conversão de uma energia de alta qualidade em energia de baixa qualidade. A Figura 5 exemplifica a quantidade de energia necessária para aquecer a água para consumo em caso de ausência dos módulos FVT, representada no gráfico por “demanda térmica residencial”.

A geração de energia térmica útil relaciona o consumo com o aumento da temperatura da água fria da rede comum de abastecimento até a temperatura de saída do sistema FVT. Como essa temperatura pode estar abaixo da temperatura de consumo, é necessário um aquecimento extra que eleve aquela temperatura até 40 °C, demandando, assim, uma energia complementar. A geração complementar (coluna laranja da Figura 5) demonstra que, na maioria dos dias analisados, a energia complementar utilizada foi inferior à metade da energia necessária para o aquecimento de água, caso o sistema fosse exclusivamente FV. Isso evidencia o potencial do sistema FVT residencial em atender à demanda de água quente, evitando consumo desnecessário de energia elétrica.

Embora o dia 6 tenha um nível de irradiação superior a 4,0 kWh/m²/dia, apresentou baixa geração térmica pelos três módulos FVT, devido à baixa vazão de água nos TC de PP, possivelmente pela temperatura média da água dentro do reservatório térmico estar em um valor próximo a temperatura dos módulos FVT na maior parte do dia, a ativação da circulação da água nos módulos FVT ocorreu por um período curto de tempo neste dia. Assim, o acúmulo de energia térmica no reservatório é um fator relevante na viabilidade de sistemas FVT residenciais, pois a água quente armazenada está disponível para uso mesmo em dias e horários em que o sistema FVT é pouco requerido.

Conclusões

A geração de energia térmica produzida pelos módulos FVT, demonstrou um maior aproveitamento da energia solar disponível, com média de 4076 Wh. A geração de energia elétrica foi, em média, nos dias analisados, igual a 13531 Wh. Portanto, a taxa global de conversão de energia solar é mais elevada, uma vez que sistemas FVT combinam geração de eletricidade e energia térmica em um único equipamento.

Os resultados evidenciaram que a função do reservatório térmico em sistemas FVT residenciais é um fator importante, uma vez que a água quente armazenada ao longo do dia, mesmo para aqueles com baixos níveis de irradiação solar, está disponível para o uso nos horários de acordo com o perfil de consumo dos moradores.

O sistema FVT residencial com TC de PP apresentou um desempenho promissor para os dias analisados em uma situação real de operação, com o consumo associado a dois chuveiros elétricos e uma torneira na cozinha. Atendendo até 66,3% da demanda de água quente para os dias com níveis de irradiação solar superiores a 4,0 kWh/m²/dia.

Agradecimentos

Ao apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015. E ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa (Processo 408129/2022-0, Chamada CNPQ/MCTI 25/2022 - Linha 2/CH Setor Elétrico Na).

Referências Bibliográficas

ALMOATHAM, Sulaiman; CHIASSEON, Andrew; MULFORD, Rydge; MORENO-PENA, Mariana. Development of experimentally-validated models for nocturnal cooling of thermal systems with photovoltaic thermal (PVT) modules. *Solar Energy*, v. 268, n. April 2023, p. 112279, 2024. DOI: 10.1016/j.solener.2023.112279

BOSU, Issa; MAHMOUD, Hatem; OOKAWARA, Shinichi; HASSAN, Hamdy. Applied single and hybrid solar energy techniques for building energy consumption and thermal comfort: A comprehensive review. *Solar Energy*, v. 259, n. January, p. 188–228, 2023. DOI: 10.1016/j.solener.2023.05.006.

CHAUHAN, Aditya; TYAGI, V. V.; ANAND, Sanjeev. Futuristic approach for thermal management in solar PV/thermal systems with possible applications. *Energy Conversion and Management*, v. 163, n. January, p. 314–354, 2018. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.008.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. *Solar engineering of thermal processes*. 3ª ed. New Jersey: Editora John Wiley & Sons, Inc., 2006. 908 p.

GIELEN, Dolf; BOSHELL, Francisco; SAYGIN, Deger; BAZILIAN, Morgan D.; WAGNER, Nicholas; GORINI, Ricardo. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, v. 24, n. January, p. 38–50, 2019. DOI: 10.1016/j.esr.2019.01.006.

HERRANDO, María et al. A review of solar hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collectors and systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 97, n. January, p. 101072, 2023. DOI: 10.1016/j.pecs.2023.101072.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *World Energy Outlook 2022*. 2022. ed. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2024.

OLIVEIRA, Ilane Caminha De; GUERRA, Maria Izabel da Silva; VIEIRA, Romênia Gurgel. Uma revisão sobre a tecnologia solar híbrida fotovoltaica e térmica no Brasil e no mundo. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 11, n. 3, p. 181–205, 2019.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014.

SANTOS, Gabriela Soares. Avaliação do desempenho de coletores solares utilizando nanofluidos de grafeno em água destilada. 2023. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/37168>.

TIWARI, Awaneendra Kumar; CHATTERJEE, Kalyan; AGRAWAL, Sanjay; SINGH, Gyanendra Kumar. A comprehensive review of photovoltaic-thermal (PVT) technology: Performance evaluation and contemporary development. *Energy Reports*, v. 10, p. 2655–2679, 2023. DOI: 10.1016/j.egy.2023.09.043.