

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO E TÉRMICO ASSOCIADO A BOMBA DE CALOR SIMULADO NO TRNSYS

Walmir Nunes Vieira Júnior (CEFET-MG) E-mail: walmirnunes@hotmail.com
Frederico Romagnoli Silveira Lima (CEFET-MG) E-mail: fredericolima@cefetmg.br

Resumo: Os coletores solares híbridos são resultados significativos da busca de aproveitamento da energia solar, visando, geralmente, a cogeração de energia elétrica e térmica. Um exemplo é o *Photovoltaic-thermal system* (PVT), que quando associado a bomba de calor é denominado *Photovoltaic-thermal system and Heat Pump* (PVT-HP). Estudos são necessários para avaliar a eficiência desses sistemas em situações específicas, como por exemplo, para aquecimento de água destinado a residências em diferentes localidades. Esta pesquisa tem como objetivo avaliar o desempenho energético de um sistema fotovoltaico e térmico assistido por bomba de calor indireta de tanque duplo, para aquecimento de água de uso doméstico, em localidades brasileiras. Para tanto, a metodologia de simulação computacional foi empregada para a realização do projeto, por meio do software *Transient System Simulation* – TRNSYS. Um padrão de consumo diário de água quente foi implementado com retiradas de água quente em horários selecionados para simular o consumo de água quente diário de uma residência brasileira, para as cidades de Belo Horizonte/MG, Brasília/DF, Florianópolis/SC e Recife/PE. O sistema apresentou melhor rendimento térmico e elétrico nos meses em que há mais horas de sol, níveis menores de umidade relativa e de precipitação, e menor consumo elétrico nos meses em que há maior temperatura média. Em Belo Horizonte/MG, Brasília/DF e Florianópolis/SC, o sistema apresentou maiores rendimentos térmico e elétrico durante os períodos em que há menores temperaturas médias, durante o outono e inverno, enquanto em Recife/PE o sistema contribui de forma mais favorável durante o período mais quente, no verão e primavera.

Palavras-chave: Energia solar, PVT-HP, Bomba de calor.

ENERGY PERFORMANCE EVALUATION OF A PHOTOVOLTAIC AND THERMAL SYSTEM ASSOCIATED WITH A HEAT PUMP SIMULATED IN TRNSYS

Abstract: Hybrid solar collectors are significant results of the quest to harness solar energy, generally aiming at cogeneration of electrical and thermal energy. An example is the Photovoltaic-thermal system (PVT), which when associated with a heat pump is called Photovoltaic-thermal system and Heat Pump (PVT-HP). Studies are needed to evaluate the efficiency of these systems in specific situations, such as, for example, for heating water for homes in different locations. This research aims to evaluate the energy performance of a photovoltaic and thermal system assisted by a double tank indirect heat pump, for domestic water heating, in Brazilian locations. Therefore, the computational simulation methodology was used to carry out the project, using the Transient System Simulation – TRNSYS software. A daily hot water consumption pattern was implemented with hot water withdrawals at selected times to simulate the daily hot water consumption of a Brazilian residence, for the cities of Belo Horizonte/MG, Brasília/DF, Florianópolis/SC and Recife/PE. The system showed better thermal and electrical performance in the months when there are more hours of sunlight, lower levels of relative humidity and precipitation, and lower electrical consumption in the months when there is a higher average temperature. In Belo Horizonte/MG, Brasília/DF and Florianópolis/SC, the system showed higher thermal and electrical yields during periods with lower average temperatures, during autumn and winter, while in Recife/PE the system contributed more favorably during the warmest period, in summer and spring.

Keywords: Solar energy, PVT-HP, Heat pump.

1. Introdução

A utilização de energia solar para aquecimento de água de uso residencial é ampla, os sistemas convencionais possuem coletores térmicos solares planos que absorvem a radiação solar e transferem o calor para o fluido. Esses sistemas são comumente denominados de *Solar Domestic Hot Water heating* – SDHW e no Brasil recebem a denominação de Sistema de Aquecimento Solar – SAS, de acordo com a NBR 15569:2020 (ABNT, 2020). Quando implementada uma bomba de calor, uma nova configuração e novos resultados são obtidos, tal configuração é denominada de *Solar Assisted Heat Pumps* – SAHP. Diversas configurações são estudadas e implementadas a fim de aumentar a eficiência térmica para cada situação específica.

A pesquisa proposta por Sterling e Collins (2011) compara três sistemas: elétrico, SAS e SAHP de estilo indireto com dois tanques de armazenamento, modelados utilizando o *software* TRNSYS e simulados para a cidade de Ottawa. Verificou-se valores menores de consumo elétrico e custo operacional do modelo SAHP indireto. A pesquisa de Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019) avaliou as mesmas configurações no TRNSYS, para a cidade de Saravejo, também apresentando resultados favoráveis para o sistema térmico assistido por bomba de calor. Outro exemplo da análise desses sistemas para aplicações domésticas é apresentado por Al-Madhhachi, Ajeena e Al-Bughaebi (2021). Os autores apresentam uma simulação computacional no TRNSYS de uma configuração SAS, localizado em duas cidades do Iraque: Bagdá e Baçorá. O modelo investiga como atender a demanda de água quente para uma família usando um coletor de placa plana. Os resultados mostram que o sistema pode fornecer água quente em Bagdá (67-81% e 39-62%) e Basrah (69-82% e 49-66%) no verão e inverno, respectivamente, usando energia solar.

Para aumentar a eficiência, sistemas híbridos vêm sendo desenvolvidos no campo da energia solar desde a década de 1970 (KUMAR e ROSEN, 2011), podendo realizar a conversão da radiação solar em mais de uma forma de energia simultaneamente e de forma sequenciada, processo denominado de “cogeração”.

O sistema *Photovoltaic-thermal* (PVT) é um exemplo híbrido que gera energia elétrica e térmica, simultaneamente, podendo ser utilizado em diversas aplicações. A principal utilização dessa tecnologia ocorre em processos de aquecimento ou pré-aquecimento de fluidos industriais ou domésticos, secagem de colheitas, entre outros, sendo vantajoso pois requer menos espaço que os sistemas elétricos e térmicos desassociados, oferecendo maiores condições de implantação e com pouco impacto em projetos arquitetônicos e em infraestruturas compactas. Além disso, o custo de produção e instalação do PVT por unidade de área é menor, se comparado aos sistemas desagregados. Também é interessante observar que a utilização de coletores térmicos e fotovoltaicos associados contribuem para um fator relevante em relação à eficiência das células fotovoltaicas, por meio da diminuição da temperatura das placas (SATHE e DHOBLE, 2017).

Associado ao sistema PVT, também é possível a utilização de bombas de calor, sendo uma medida para reduzir a demanda de energia elétrica em edifícios, comumente denominado *Photovoltaic-Thermal system and Heat Pump* (PVT-HP). Segundo Del Amo *et al.* (2019), a implementação de bomba de calor a sistemas PVT é favorável, uma vez que a energia solar fornece uma fonte de calor que permite operar o evaporador do ciclo da bomba de calor a uma temperatura superior à temperatura ambiente do fluido. A bomba de calor é um dispositivo que retira calor de um local (um fluido, como água ou ar, por exemplo) e o entrega para outro local a uma temperatura mais elevada. Na maioria dos casos, a bomba de calor é alimentada por eletricidade, acionando o compressor mecânico.

O estudo realizado por Del Amo *et al.* (2019) propõe uma configuração técnica destinada à edifícios industriais, comerciais e de serviços com elevada procura de água aquecida, sendo constituída basicamente por caldeira, bomba de calor e painéis PVT. Os resultados mostram que a temperatura fria de trabalho varia de 10 a 20 °C e o COP sazonal subiu para 4,62, em vez de 2,96 quando se trabalha entre 7 e 10 °C. Os 67,6% da eletricidade demandada pela bomba de calor são fornecidos pela produção fotovoltaica (9309 kWh/ano dos 13.771 kWh). A análise econômica indicou um período de retorno de cerca de seis anos.

Emmi *et al.* (2020) desenvolveram um novo modelo de simulação de parâmetros concentrados para sistemas PVT-HP, destinados a aquecimento de água de uso doméstico, utilizando o *software Transient System Simulation – TRNSYS*. O estudo avaliou três localidades, Veneza, Roma e Palermo, a fim de investigar a resposta do sistema PVT a diferentes condições climáticas. Os resultados apresentaram comparações de ganhos térmicos e elétricos para cada localidade, que variam de acordo com a temperatura necessária para aquecer a água em cada local. Como forma de impulsionar a sustentabilidade da produção, foi acrescentado um dispositivo de armazenamento de energia elétrica, que armazena o excesso de energia elétrica produzida e disponibilizada à bomba de calor quando necessário.

A pesquisa de Martorana *et al.* (2021) investiga configurações para sistema PVT – HP, sendo utilizado o modelo de bomba de calor de ar-água, destinado a aquecimento de água para uso doméstico para uma microcomunidade energética em contexto de baixa densidade habitacional no sul da Itália. Para tanto, foram realizadas simulações no TRNSYS de sistemas PV, PVT e solares térmicos aliados à bomba de calor. Os resultados mostram como o consumo de energia dos sistemas analisados é influenciado principalmente pela quantidade e estrutura da demanda diária de água quente sanitária. Além disso, de acordo com os layouts de plantas escolhidos e a localidade analisada, é mostrado que a contribuição térmica do PVT influencia levemente o desempenho do sistema, não apresentando valores consideráveis. Dessa forma, a pesquisa considera que o sistema PV é mais indicado, uma vez que requer menos componentes. Em contrapartida, a pesquisa de Koşan e Aktaş (2021) constatou resultados mais favoráveis para a utilização do PVT-HP em detrimento ao PV-HP. O painel térmico fotovoltaico foi capaz de armazenar 1,07 kWh de energia elétrica e produziu 9,59% mais eletricidade que o painel fotovoltaico. As maiores eficiências elétricas e térmicas médias do painel térmico fotovoltaico para o sistema de bomba de calor foram medidas de 16,74% e 66,98%, respectivamente. Observou-se que o coeficiente médio de desempenho do sistema de bomba de calor variou entre 2,93 e 3,18.

As simulações numéricas realizadas por Rijvers, Rindt e Keizer (2022), utilizando o *software TRNSYS*, avaliaram a eficiência energética de um sistema PVT-HP, em que foi comprovada a eficiência desse tipo de sistema para atender à demanda anual de energia de um edifício residencial. O Fator de Desempenho Sazonal (FPS), que corresponde à razão entre a saída de energia térmica útil do sistema para a entrada de energia elétrica para o sistema, é igual a 3,6. Além disso, foi analisado o efeito de diferentes condições climáticas, ocupação e orientações de construção no desempenho do sistema de referência. O FPS para os cenários investigados variou entre 3,0 e 3,9.

Para incentivar e ampliar a utilização dos sistemas de energia solar, é necessário compreender informações técnicas sobre estes sistemas, como valores de geração de calor e eletricidade anual e custos desses sistemas. Para tanto, são necessários estudos experimentais, simulações computacionais, validação e detalhamento de modelos matemáticos empregados. Sendo assim, torna-se interessante proporcionar a elaboração de projetos ótimos, com melhores meios de geração de energia e menores incertezas. Nesse sentido, para proporcionar fundamentação para implementação de sistemas PVT-HP para uso residencial é necessário

avaliar parâmetros específicos do projeto em observância à demanda energética e às condições climáticas.

Para a realização deste estudo, assume-se como objetivo geral avaliar o desempenho energético de um sistema fotovoltaico e térmico assistido por bomba de calor indireta de tanque duplo, para aquecimento de água de uso doméstico, em localidades brasileiras. Os objetivos específicos propostos para este trabalho são: modelar um sistema fotovoltaico e térmico utilizando bomba de calor (PVT-HP) no *software* TRNSYS, determinar os rendimentos térmico e elétrico e o consumo do sistema PVT-HP, mensais e diários em diferentes condições climáticas brasileiras, tais como para as cidades de Belo Horizonte/MG, Brasília/DF, Florianópolis/SC e Recife/PE.

2. Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foram realizadas simulações computacionais utilizando o *software Transient System Simulation – TRNSYS* versão 16.01.0003, disponível no *campus* do CEFET-MG.

O *software* TRNSYS oferece diversas possibilidades de configurações para que o projeto se aproxime dos valores reais de seu funcionamento. Essas configurações gerais e específicas são denominadas de parâmetros (TRNSYS, 2006). Dessa forma, para que esta pesquisa pudesse ser executada, alguns parâmetros precisaram ser definidos para que o projeto seja realista e exequível. É apresentado, por meio da Figura 1, um esquema básico da composição do sistema PVT-HP de tanque duplo, e em seguida é apresentado, por meio da Figura 2, o respectivo projeto simulado no TRNSYS, proposto por este trabalho.

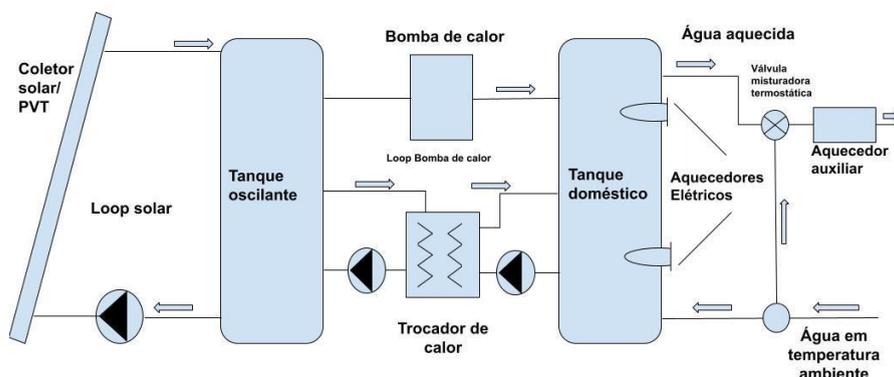


Figura 1 - Esquema básico do sistema PVT-HP de tanque duplo

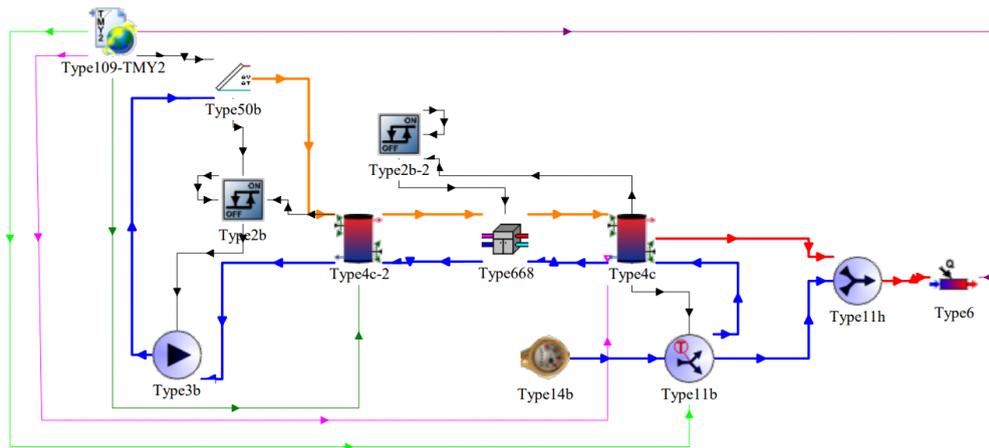


Figura 2 – Sistema PVT-HP de tanque duplo simulado no TRNSYS

Primeiramente, foi necessário definir parâmetros iniciais, como os fluxos de massa de tiragem de água ao longo do dia em uma residência no Brasil. No país, o aquecimento de água é comumente utilizado para aquecimento de água para banho, dessa forma, estipulou-se quatro retiradas de água quente a uma temperatura de 55 °C, durante 15 minutos, a um fluxo de massa de 300 kg/h (*Type14b*), nos seguintes horários: 06 h, 08 h, 20 h, 22 h. Embora não sejam necessariamente realísticos, esses valores são suficientes para fins comparativos. A temperatura de entrada da água no sistema foi definida como igual à temperatura do ambiente, conforme arquivo climático das cidades analisadas disponibilizado pelo TRNSYS.

As simulações foram realizadas no período de um ano (8760 h), e o intervalo de tempo da simulação foi considerado como 0,015 h (54 s). A fim de considerar os resultados para diferentes condições climáticas brasileiras, foram analisados os resultados referentes às cidades de Belo Horizonte/MG, Brasília/DF, Florianópolis/SC e Recife/PE, localizadas em diferentes regiões do país. O ângulo de inclinação do módulo PVT ou coletor térmico com a superfície horizontal é definido de acordo com a latitude local, podendo ter uma variação de aproximadamente 5° a 10° sobre o módulo do valor da latitude (DUFFIE e BECKMAN, 2013). Dessa forma, foi definido para cidades os seguintes valores: 30° para Belo Horizonte/MG, 26° para Brasília/DF, 38° para Florianópolis/SC e 18° para Recife/PE.

O tanque doméstico de água modelado (*Type4c*) possui 350 L, altura de 1,2 m, é estratificado, com perdas uniformes e valores de entrada variáveis. Para a estratificação, o tanque é dividido em 10 (dez) nós de mesma dimensão. Existem dois aquecedores auxiliares de 2 kW, o aquecedor superior e o inferior estão localizados nos nós 02 e 08, respectivamente. O modo de operação permite que apenas um aquecedor funcione por vez, quando as condições térmicas pré-estabelecidas são atendidas, prevalecendo o acionamento do aquecedor superior. São dispostos também dois termostatos nesses nós para controlar a temperatura com o ponto de ajuste, que será definido no parâmetro do componente no sistema. Os aquecedores auxiliares presentes no tanque doméstico tiveram seus pontos de ajuste definidos como 45 °C e 15 °C, ambos usando uma banda morta de 5 °C. A temperatura de banda morta corresponde à diferença entre o ponto de ajuste e o ponto onde o interruptor é acionado.

O segundo tanque é denominado como oscilante, pois é permitido que a temperatura do fluido em seu interior oscile constantemente ao longo do dia. Esse componente possui as mesmas características do tanque doméstico, com a exceção do volume, que corresponde a 500 L, e os dois aquecedores auxiliares presentes no topo e no fundo do tanque oscilante tiveram como

ponto de ajuste 5 °C e 10 °C, com banda morta de 5 °C. O coeficiente de perda global uniforme para os tanques foi definido como 0,833 W/m².K. Os valores de referência escolhidos para os tanques foram baseados nas pesquisas de Sterling e Collins (2011) e Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019).

Para garantir que a água seja entregue no ponto de ajuste definido (55 °C), foi usada uma válvula misturadora termostática (*Type11b*), que atuaria quando a temperatura da água no topo do tanque doméstico estivesse acima desse ponto de ajuste. Nesse caso, a válvula misturada libera água da rede, a temperatura ambiente, para esfriar a água que será entregue ao final do sistema até a temperatura do ponto de ajuste. Em contrapartida, caso a água no topo do tanque esteja abaixo do ponto de ajuste no momento da retirada de água, um aquecedor auxiliar (*Type6*) de 2 kW foi instalado após a válvula misturadora. O parâmetro “temperatura ambiente” dos tanques e do aquecedor auxiliar foram definidos com base no arquivo climático da cidade analisada.

Os parâmetros escolhidos para o módulo PVT (*Type50b*) foram baseados no estudo de Barbu, Darie e Siroux (2020), conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros do Módulo PVT

Parâmetro	Valor	Unidade
Eficiência elétrica da célula	16	%
Área do PVT	4	m ²
Coefficiente de temperatura da célula	-0,5	%

Fonte: Adaptado de Barbu, Darie e Siroux (2020).

A bomba, modelada por meio do *Type3b*, é responsável pela circulação de água no circuito solar a uma taxa de 100 kg/h, consumindo 60 kJ/h de energia e operando sempre em 100% de potência. Os arquivos de dados climáticos, inseridos no *Type109-TMY2*, serão selecionados de acordo com as cidades escolhidas para as análises deste estudo, conforme citado anteriormente.

O controlador (*Type2b*) é um componente imprescindível para o correto funcionamento desses sistemas. Ele garante que a bomba apenas seja ativada quando há energia suficiente para ser coletada, monitorando a temperatura no fundo do tanque e a temperatura de saída do módulo PVT. Para o circuito solar, se a temperatura da água de saída do módulo PVT está 5 °C ou mais acima da temperatura do fundo do tanque, então a bomba é ativada, permanecendo em funcionamento até que esta diferença se reduza para 0 °C. Outrossim, o controlador também monitora a temperatura no topo do tanque doméstico para garantir que não alcance a temperatura de ebulição do fluido, para isso, foi inserido nos parâmetros do *Type* um corte de alta temperatura de 80 °C. Se a água alcançar essa temperatura, o controlador envia um sinal de desligamento para a bomba que interrompe seu funcionamento, independente da diferença de temperatura da água no módulo solar e no tanque.

Nesse sistema é implementada a utilização de uma mistura de 50% de água e 50% de glicol no circuito solar, com calor específico de 3,29 kJ/kg.K, medida que se justifica para evitar a condensação do fluido nos dias mais frios, permitindo que o fluido diminua a temperaturas abaixo de 0 °C.

Foi inserido mais um controlador (*Type2b*) visando controlar o funcionamento da bomba de calor. Para o circuito da bomba de calor, foi definido 55 °C como temperatura de ponto de

ajuste, e um valor de banda morta de 3 °C, dessa forma, a bomba de calor é acionada quando a temperatura do topo do tanque é menor que 52 °C e permanece ligada até que a água seja aquecida até 55 °C.

Para que o *Type668* possa realizar a modelagem da bomba de calor, é necessário que haja um arquivo externo de desempenho deste componente. Para tanto, foi escolhido o modelo de bomba de calor água e água Trane EXW 060 e elaborado o arquivo externo com base nas informações de catálogo do equipamento. A capacidade nominal e a potência por bomba de calor foram consideradas como 21,72 e 5,05 kW, respectivamente. As vazões nominais da fonte e da carga foram consideradas como 2840 e 1702,8 kg/h, enquanto as vazões da fonte e da carga foram consideradas como 1200 kg/h (TRANE, 2020).

Apenas um trocador de calor é necessário nos momentos em que a temperatura do topo do tanque oscilante está acima de 55 °C, na Figura 1 é apresentado esse circuito de *by-pass*. Para que isso ocorra, o trocador de calor foi simulado a partir da codificação do arquivo externo da bomba de calor. Se a temperatura de entrada da fonte for maior que 55 °C, apenas uma bomba seria necessária para realizar a troca de calor. Dessa forma, foram inseridas no arquivo externo da bomba de calor as temperaturas de entrada da fonte de 55 °C, 55,1 °C e 70 °C. Quando a temperatura de entrada da fonte atinge 55,1 °C apenas a bomba era necessária para realizar a troca de calor, reduzindo consideravelmente a potência visto que a bomba de calor exigiria uma quantidade maior para operar o compressor.

3. Resultados e discussão

Nesta seção é apresentada a análise do desempenho do sistema PVT-HP, por meio de simulações ao longo dos meses e de dias do ano, avaliando o comportamento dos componentes e os resultados sazonais.

3.1 Desempenho térmico e elétrico diário

Os dados simulados para o período de um ano foram tabulados em resultados mensais, objetivando compreender em quais períodos ocorreram os melhores índices de ganhos térmicos/elétricos e menores valores de consumo elétrico. Tendo em vista que os resultados apresentaram significativa variação para cada localidade, as análises foram realizadas individualmente, conforme se segue. Os valores referentes ao consumo elétrico dos aquecedores auxiliares nos tanques foram suprimidos das tabelas visto que não foram acionados durante todo o tempo de simulação.

Os resultados mensais referentes à Belo Horizonte/MG são apresentados na Tabela 2. Observa-se que o sistema demonstrou melhor rendimento térmico e elétrico nos meses de abril a setembro, e menor consumo elétrico entre novembro e abril. Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2022), o município apresenta maiores temperaturas médias entre outubro e março, variando entre 23 e 24 °C, entretanto, durante esses meses também há os maiores índices de precipitação, variando de 110,1 a 339,1 mm. Além disso, os meses com maior disponibilidade de horas de sol e menores índices de umidade relativa compensada estão entre março e setembro.

Tabela 2 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Belo Horizonte/MG

	MJ/mês											
	Jan	Fev	Mar	Abri l	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Consumo total elétrico	348	261	334	326	368	380	372	342	325	363	335	359
<i>Qu</i>	1114	1211	1190	1304	1328	1401	1450	1444	1344	1236	1186	1147
<i>Qe</i>	183	217	195	224	222	234	250	251	231	202	198	184

Fonte: o autor.

Os rendimentos térmico e elétrico do sistema para a cidade de Brasília/DF apresentou um comportamento semelhante ao de Belo Horizonte/MG, conforme observa-se na Tabela 3, tendo em vista que ambos estão presentes em regiões consideradas como subquente e sub-úmido de clima tropical Brasil Central. Os meses que apresentaram melhores resultados de consumo e rendimento térmico e elétrico foram de abril a setembro, os quais possuem maior disponibilidade de horas de sol e valores menores de precipitação, umidade relativa compensada e temperatura média compensada (INMET, 2022).

Tabela 3 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Brasília/DF

	MJ/mês											
	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Consumo total elétrico	350	276	328	285	288	293	290	226	268	340	350	361
<i>Qu</i>	1207	1222	1286	1411	1485	1547	1630	1587	1384	1281	1200	1216
<i>Qe</i>	202	219	219	254	269	280	294	294	250	213	200	201

Fonte: o autor.

Os resultados apresentados pelo sistema em Florianópolis/SC, conforme Tabela 4, apontaram melhores rendimentos térmicos e elétricos nos meses de abril a agosto e janeiro, período em que há menores níveis de precipitação e maior umidade relativa compensada (INMET, 2022). Em contrapartida, o sistema apresentou menor consumo elétrico durante os meses de novembro a março, período com maiores níveis de temperatura média compensada (INMET, 2022).

Tabela 4 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Florianópolis/SC

	MJ/mês											
	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Consumo total elétrico	258	256	313	329	420	433	433	427	464	482	339	326
<i>Qu</i>	1266	1116	1197	1220	1320	1293	1402	1408	1216	1047	1288	1272
<i>Qe</i>	233	196	201	207	213	210	234	236	192	147	221	219

Fonte: o autor.

Para a cidade de Recife/PE, os melhores rendimentos térmicos e elétricos do sistema ocorreram nos meses de janeiro, abril, agosto, outubro e dezembro, conforme Tabela 5, período que há menores índices de precipitação e umidade relativa compensada e maior quantidade de horas solares. O menor consumo foi observado entre outubro e abril, período com maiores temperaturas médias compensadas (INMET, 2022).

Tabela 5 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Recife/PE

	MJ/mês											
	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Consumo total elétrico	120	155	135	94	148	169	208	170	141	101	123	144
Q_u	1332	1175	1202	1386	1258	1195	1295	1315	1190	1299	1252	1423
Q_e	264	227	236	283	242	226	243	251	233	267	248	281

Fonte: o autor.

Com base no exposto, observa-se constância de rendimento térmico e elétrico favorável para os meses em que há mais horas de sol, níveis menores de umidade relativa compensada e de precipitação, e menor consumo elétrico nos meses em que há maior temperatura média compensada. Em Belo Horizonte/MG, Brasília/DF e Florianópolis, o sistema apresentou maiores rendimentos térmico e elétrico durante os períodos em que há menores temperaturas médias, durante o outono e inverno, enquanto em Recife/PE o sistema contribui de forma mais favorável durante o período mais quente, no verão e primavera, semelhante ao desempenho observado por Al-Madhhachi, Ajeena e Al-Bughaebi (2021). Nota-se que o principal componente do sistema PVT-HP que colabora para essa variação do consumo elétrico da rede é a bomba de calor.

3.2 Desempenho térmico e elétrico diário

Para compreensão do desempenho elétrico e térmico diário do sistema PVT-HP, foram simulados um dia de janeiro e um dia de julho, avaliando a saída de energia elétrica e térmica útil pelo sistema em função do tempo (24 horas). Dessa forma, por meio da Figura 3 é apresentado o resultado da simulação para as quatro cidades analisadas, sendo que (a) corresponde à saída de energia elétrica pelo módulo PVT (Q_e) e (b) ao aproveitamento térmico obtido pelo módulo (Q_u), referente à 01 de janeiro. As quatro cidades tiveram a geração de energia elétrica pelo painel fotovoltaico se iniciando por volta de 06 h e se estendendo até por volta de 19 h, entretanto, em Belo Horizonte e Brasília o rendimento é significativamente menor. Outrossim, quanto ao Q_u , a temperatura no coletor solar só se mostrou em nível útil ao sistema entre, aproximadamente, 07 h e 18 h, para Florianópolis e Recife. Já em Belo Horizonte e Brasília essa temperatura só foi alcançada durante 11h e 17h, um aproveitamento horário quase 50% inferior e com níveis de energia térmica útil de, aproximadamente, quatro vezes menor.

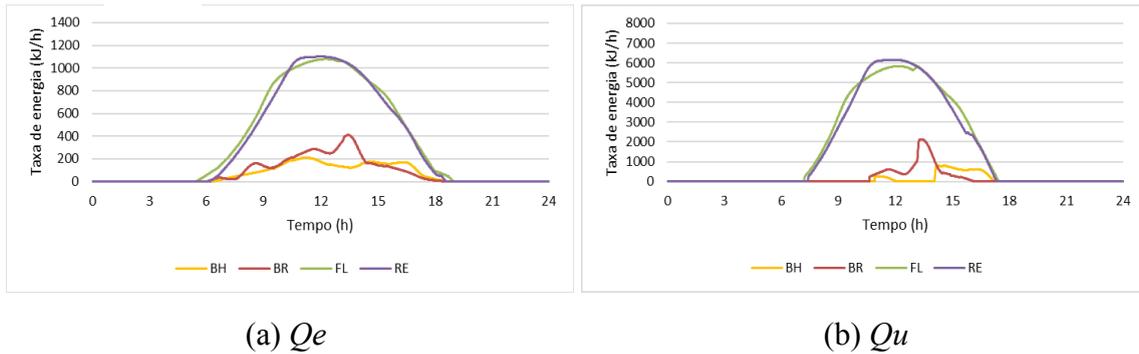


Figura 3 – Energia útil obtida pelo coletor em janeiro

Na Figura 4 estão apresentados os resultados de Q_e (a) Q_u (b) referentes a primeiro de julho. O tempo de geração de energia elétrica reduziu se comparado a janeiro, ocorrendo entre 07 h e 18 h, no entanto a saída de energia elétrica foi significativamente maior em Belo Horizonte e Brasília, com maiores picos em Recife e Florianópolis. O comportamento da energia térmica útil comparado a janeiro foi semelhante, Belo Horizonte e Brasília tiveram um aumento significativo da taxa de energia e o tempo de aproveitamento solar, em Recife e Florianópolis houve uma redução do tempo de aproveitamento, mas picos maiores de taxa de energia ao longo do dia.

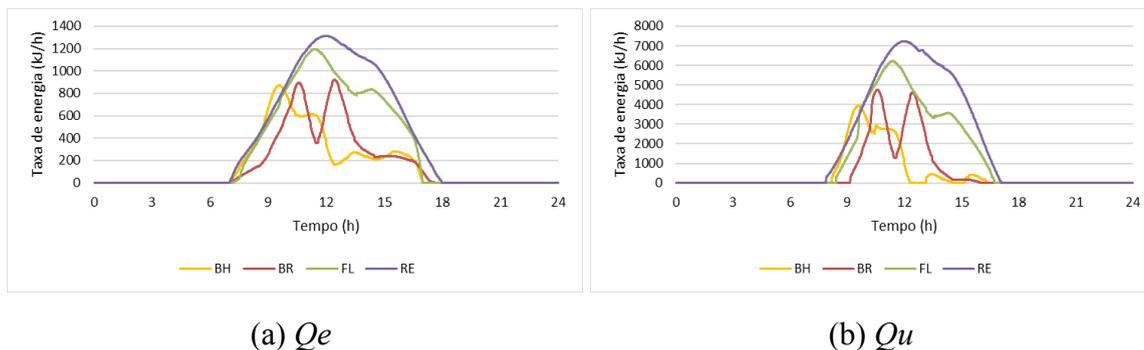


Figura 4 – Energia obtida pelo painel PVT em julho

Os resultados se assemelham aos gráficos apresentados na pesquisa de Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019), embora as condições climáticas sejam diferentes, nota-se o comportamento semelhante dos valores.

3.3 Desempenho da bomba de calor e do trocador de calor

Primeiramente, objetivando compreender os momentos em que a bomba de calor é acionada, foram simulados e coletados os resultados, para cada cidade, de um dia de janeiro e um dia de julho. Tendo em vista que a bomba de calor é acionada quando a temperatura no topo do tanque doméstico reduz até a banda morta definida (52 °C) e permanece em operação até que atinja o ponto de ajuste de 55 °C, constatou-se maior estabilidade da temperatura em Recife em ambos os dias analisados, e para Florianópolis em janeiro. Ao longo da manhã, a temperatura da água se mantém acima da banda morta mesmo após as duas retiradas matinais (06 h e 08 h), sendo necessário o acionamento da bomba apenas por volta de 12 e 15 h em janeiro e entre 09 e 12h em julho, em todos os casos analisados. Já nas retiradas noturnas (20 h e 22 h), houve o acionamento após a primeira demanda em todos os casos, mas em Brasília

e Belo Horizonte houve maior instabilidade na temperatura, fazendo com que a bomba fosse acionada mais vezes durante o período entre 18 e 23 h.

Para descrever o desempenho da bomba de calor integrada ao trocador de calor durante o dia, foram simulados quatro dias ao longo de um ano para analisar a quantidade de energia absorvida do fluido da fonte ($Q_{absorvida}$) e a capacidade de aquecimento do fluido da carga ($Cap_{aquecimento}$) para cada cidade, conforme Figura 5, em que (a) corresponde a Belo Horizonte, (b) Brasília, (c) Florianópolis e (d) Recife. Observa-se quem em Recife a quantidade de energia absorvida da fonte se aproxima do valor da capacidade de aquecimento, uma vez que nessa localidade a bomba de calor foi menos utilizada que o trocador de calor, visto que a temperatura do fluido da fonte alcançou com frequência o ponto de ajuste (55 °C). Em Florianópolis, os meses de janeiro e abril também tiveram baixa utilização da bomba de calor. Em contrapartida, em Brasília e Belo Horizonte, a bomba de calor operou com mais frequência, principalmente nos meses de janeiro, julho e outubro.

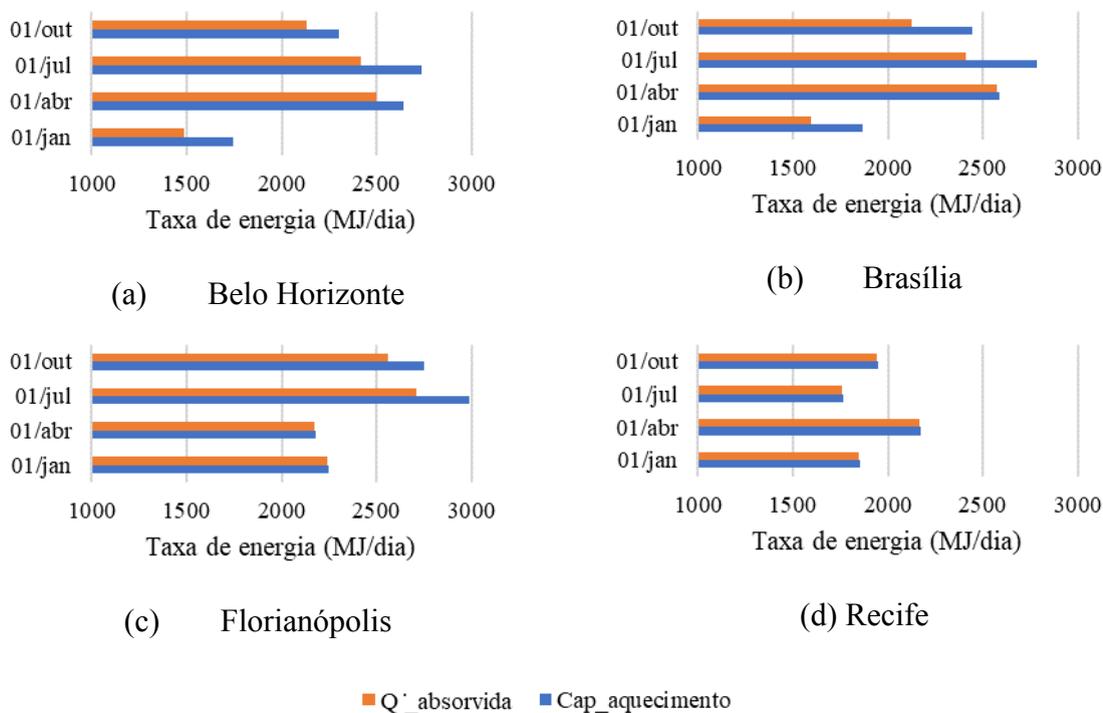


Figura 5 – Capacidade de aquecimento e energia absorvida pela bomba de calor integrada ao trocador de calor

Vale ressaltar, que devido ao circuito de *by-pass* implementado para simular o trocador de calor, ficou inviável a análise isolada da bomba de calor, não sendo possível o cálculo do Coeficiente de Performance (COP). Constatou-se que em Recife/PE a bomba de calor é acionada com menor frequência.

4. Conclusão

A análise do desempenho mensal propiciou a percepção de que o funcionamento do sistema tem forte relação com os meses em que há mais horas de sol e níveis menores de umidade

relativa compensada e precipitação. Um fator relevante observado é o de que em Belo Horizonte, Brasília e Florianópolis o sistema apresentou melhores resultados durante os meses em que a temperatura média é menor, no inverno e outono, onde, conseqüentemente, há maior demanda de água aquecida.

As simulações apresentadas neste estudo não representam necessariamente um perfil típico de demanda real de extração de água, dessa forma, as tendências dos dados obtidos são mais importantes que os valores resultantes. Sugere-se, como trabalhos futuros, a validação do projeto por meio de avaliação experimental e a elaboração de protótipos para analisar os benefícios potenciais do sistema. Além disso, outras configurações de sistemas PVT-HP também podem ser analisadas, assim como a utilização de outros fluidos de trabalho.

Referências

- ABNT.** *NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito elétrico direto: projeto e instalação.* Rio de Janeiro, 2020.
- AL-MADHHACHI, H. S.; AJEENA, A. M.; AL-BUGHAEBI, N. A.** *Dynamic simulation and energy analysis of forced circulation solar thermal system in two various climate cities in Iraq.* AIMS Energy, Najaf, 05 Janeiro 2021. 138-149.
- BARBU, M.; DARIE, G.; SIROUX, M.** *A Parametric Study of a Hybrid Photovoltaic Thermal (PVT) System Coupled with a Domestic Hot Water (DHW) Storage Tank.* Energies, 2020.
- COŞKUN, S.; KANDIRMIŞ, G.; TUNÇKAL, C.** *Analysis of a heat pump assisted solar water heating system using TRNSYS program.* Renewable Energy Technology, 2019. 45–55.
- DEL AMO, A. et al.** *Performance analysis and experimental validation of a solar-assisted heat pump fed by photovoltaic-thermal collectors.* Energy, Zaragoza, 15 Fevereiro 2019. 1214-1223.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A.** *Solar engineering of thermal processes.* 4^a. ed. Nova Iorque : Wiley, 2013.
- EMMI, G. et al.** *A simulation-based analysis of photovoltaic thermal hybrid solar collectors with a new TRNSYS type model.* Journal of Physics: Conference Series. [S.l.]: IOP Publishing. 2020. p. 012030.
- INMET.** *Base de Dados Meteorológicos, 2022.* Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 2023 Junho 01.
- KOŞAN, M.; AKTAŞ, M.** *Performance investigation of a double pass PVT assisted heat pump system with latent heat storage unit.* Applied Thermal Engineering, v. 199, p. 117524, 2021.
- KUMAR, R.; ROSEN, M. A.** *A critical review of photovoltaic-thermal solar collectors for air heating.* Applied Energy, v. 88, n. 11, p. 3603-3614, 2011.
- MARTORANA, F. et al.** *Solar-assisted heat pumps systems for domestic hot water production in small energy communities.* Solar Energy, Palermo, 15 Março 2021. 113-133.
- RIJVERS, L.; RINDT, C.; KEIZER, C. D.** *Numerical Analysis of a Residential Energy System That Integrates Hybrid Solar Modules (PVT) with a Heat Pump.* Energies, 23 Dezembro 2022. 1-29.
- SATHE, T. M.; DHOBLE, A. S.** *A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 76, p. 645-672, 2017.
- STERLING, S. J.; COLLINS, M. R.** *Feasibility analysis of an indirect heat pump assisted solar domestic hot water system.* Applied Energy, Waterloo, 1 Julho 2011. 11-17.
- TRANE.** *Water Source Heat Pump Axiom™ Water-to-Water — EXW.* TRANE Technologies, 2020. Disponível em: <https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/products-systems/equipment/unitary/water-source-heat-pumps/water-to-water-wshp/WSHP-PRC022F-EN_03202020.pdf>. Acesso em: 27 Fevereiro 2023.
- TRNSYS.** *TRNSYS 16: A Transient System Simulation Program - Volume 3: Standart Component Library Overview.* Madison: University of Wisconsin, 2006.