



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNÓLOGICA DE MINAS GERAIS**  
**Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

**DISSERTAÇÃO**

**WALMIR NUNES VIEIRA JÚNIOR**

**ESTUDO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DA  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO E  
TÉRMICO ASSOCIADO A BOMBA DE CALOR**

**Orientador:** Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima

**Linha de Pesquisa:** Eficiência Energética

Belo Horizonte  
2023

Walmir Nunes Vieira Júnior

**Estudo computacional para avaliação da eficiência energética de sistema fotovoltaico e térmico associado a bomba de calor**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima

**Linha de Pesquisa:** Eficiência Energética

Belo Horizonte  
2023

V658e Vieira Júnior, Walmir Nunes  
Estudo computacional para avaliação da eficiência energética de sistema fotovoltaico e térmico associado a bomba de calor / Walmir Nunes Vieira Júnior. – 2023.  
95 f. : il., gráfs, tabs.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.  
Orientador: Frederico Romagnoli Silveira Lima.  
Banca examinadora: Frederico Romagnoli Silveira Lima, André Guimarães Ferreira, Cristiana Brasil Maia.  
Bibliografia: f. 89-92.  
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Energia solar – Teses. 2. Sistemas de energia fotovoltaica – Teses. 3. Meios de transferência de calor – Teses. 4. Bomba de calor – Teses. I. Lima, Frederico Romagnoli Silveira. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDD 621.47

Walmir Nunes Vieira Júnior

Estudo computacional para avaliação da eficiência energética de sistema fotovoltaico e térmico associado a bomba de calor

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Linha de Pesquisa:** Eficiência Energética

Belo Horizonte, 14/08/2023

Resultado: APROVADO

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente  
FREDERICO ROMAGNOLI SILVEIRA LIMA  
Data: 16/08/2023 16:21:10-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Documento assinado digitalmente  
ANDRE GUIMARAES FERREIRA  
Data: 16/08/2023 10:39:32-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Documento assinado digitalmente  
CRISTIANA BRASIL MAIA  
Data: 16/08/2023 14:56:35-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profa. Dra. Cristiana Brasil Maia  
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Dedico este trabalho aos meus pais, Neuza e Valmir, pelo exemplo de vida, pelo apoio e incentivo em todos os meus sonhos e objetivos e pela confiança depositada em mim durante todos os meus passos. Nenhuma conquista minha seria possível sem vocês.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela oportunidade e por toda a força durante o caminho pela conquista desse sonho.

Ao professor Orientador Frederico Romagnoli, que com excelência conduziu essa pesquisa. Obrigado por todo apoio e confiança durante cada etapa. A sua sabedoria e conhecimento o tornaram, para mim, um exemplo de profissional.

À minha irmã Mírian pelas palavras de conforto, esperança e força em todos os momentos de dificuldade.

Ao Kairo pelo apoio, paciência, compreensão e por sempre acreditar em mim, mesmo em momentos em que eu mesmo não acreditava.

À Camilla, pela consciência de ter uma amizade na qual posso contar em qualquer momento.

À FAPEMIG, pela bolsa concedida.

Aos professores do PPGEM e à equipe técnico-pedagógica, que proporcionaram um ambiente agradável e enriquecedor, mesmo com os desafios do ensino remoto. Obrigado por me atenderem com educação e presteza sempre que precisei.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos, colegas do PPGEM, familiares e outras pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para que eu chegasse até aqui. Essa conquista tem uma parte de cada pessoa que tive ao meu lado durante essa jornada.

“Não é no silêncio que os homens se fazem, mas  
na palavra, no trabalho, na ação-reflexão.”

Paulo Freire

## 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 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. Para avaliar a viabilidade de implementação do sistema e os rendimentos térmicos e elétricos, foram projetados e simulados cinco sistemas: elétrico, solar térmico, PVT, solar térmico assistido por bomba de calor e PVT-HP. 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, foram simulados para as cidades de Belo Horizonte/MG, Brasília/DF, Florianópolis/SC e Recife/PE. Foi realizada a comparação dos valores simulados com bibliografias semelhantes e constatou-se a validade dos sistemas elaborados. O sistema PVT-HP apresentou uma redução de aproximadamente 80% de consumo elétrico da rede se comparado a um sistema totalmente elétrico, e de cerca de 70% se comparado a sistemas convencionais de aquecimento solar de água. Os valores médios mensais de eficiência térmica e elétrica para cada cidade, respectivamente, são: 62,25 e 10,98% para Belo Horizonte/MG, 61,70 e 10,79% para Brasília/DF, 67,03 e 11,09% para Florianópolis/SC e 51,08 e 9,99% para Recife/PE. As cidades que apresentaram maiores valores de economia de energia elétrica, quanto ao custo operacional, foram Belo Horizonte, Brasília e Florianópolis.

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

## ABSTRACT

### COMPUTATIONAL STUDY TO EVALUATE THE ENERGY EFFICIENCY OF A PHOTOVOLTAIC AND THERMAL SYSTEM ASSOCIATED WITH A HEAT PUMP

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 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. To evaluate the feasibility of implementing the system and the thermal and electrical yields, five systems were designed and simulated: electric, solar thermal, PVT, solar thermal assisted by heat pump and PVT-HP. 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, were simulated for the cities of Belo Horizonte/MG, Brasília/DF, Florianópolis/SC and Recife PE. The simulated values were compared with similar bibliographies and the validity of the elaborated systems was verified. The PVT-HP system showed a reduction of approximately 80% in electricity consumption from the grid compared to a fully electric system, and around 70% compared to conventional solar water heating systems. The monthly average values of thermal and electrical efficiency for each city, respectively, are: 62.25 and 10.98% for Belo Horizonte/MG, 61.70 and 10.79% for Brasília/DF, 67.03 and 11, 09% for Florianópolis/SC and 51.08 and 9.99% for Recife/PE. The cities that showed the highest values of electricity savings, in terms of operating costs, were Belo Horizonte, Brasília and Florianópolis.

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

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Configuração SAS e SAHP.....	21
Figura 2 - Classificação de sistemas PVT convencionais e novos .....	23
Figura 3 - Esquema do sistema PVT .....	24
Figura 4 - Eficiência térmica e das células solares de acordo com a disposição do módulo PV na superfície do coletor térmico .....	25
Figura 5 - Ângulos notáveis em solarimetria .....	31
Figura 6 – Fontes de energias utilizadas no Brasil.....	33
Figura 7 - Potencial de geração fotovoltaica média anual em todo território brasileiro .....	34
Figura 8 – Demanda de energia térmica no Brasil .....	35
Figura 9 - Modelo esquemático de bomba de calor (água/água) .....	39
Figura 10 - Fluxograma da metodologia.....	46
Figura 11 – Sistema 01: aquecimento elétrico de água.....	49
Figura 12 - Esquema básico do sistema solar de aquecimento de água.....	50
Figura 13 - Sistema 02: SAS.....	51
Figura 14 - Sistema 03: PVT.....	51
Figura 15 - Esquema básico dos sistemas 04 e 05.....	54
Figura 16 - Sistema 04: SAHP .....	54
Figura 17 - Sistema 05: PVT-HP.....	55
Figura 18 - Modelo da bomba de calor para temperatura de entrada da carga de 10°C .....	56
Figura 19 - Configuração do sistema de Sterling e Collins (2011).....	59
Figura 20 - Modelos TRNSYS das pesquisas de referência para os Sistemas 02 e 03.....	60
Figura 21 - Modelo TRNSYS de Sterling e Collins (2011).....	61
Figura 22 – Taxas de energia anual dos sistemas .....	66
Figura 23 – Valores anuais de tarifa de consumo elétrico dos sistemas .....	68
Figura 24 – Eficiência elétrica e térmica mensal do sistema PVT-HP .....	73
Figura 25 – Energia útil obtida pelo coletor em janeiro.....	75

Figura 26 – Energia obtida pelo painel PVT em julho.....	76
Figura 27 – Consumo de energia pela bomba de calor integrada ao trocador de calor em um dia de janeiro .....	77
Figura 28 - Consumo de energia pela bomba de calor integrada ao trocador de calor em um dia de julho .....	77
Figura 29 – Capacidade de aquecimento e energia absorvida pela bomba de calor integrada ao trocador de calor .....	78
Figura 30 – Perdas térmicas dos tanques de armazenamento em um dia de janeiro.....	79
Figura 31 – Perdas térmicas dos tanques de armazenamento em um dia de julho.....	80
Figura 32 – Variação do volume do tanque doméstico.....	81
Figura 33 – Variação do volume do tanque oscilante.....	81
Figura 34 – Variação da área do módulo PVT .....	85
Figura 35 – Resultados do projeto otimizado .....	85
Figura 36 – Resultados do aumento da área do módulo PVT no projeto otimizado .....	86
Figura 37 – Resultados do aumento de volume do tanque oscilante no projeto otimizado...	87

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 - <i>Types</i> no TRNSYS .....	36
Quadro 2 - Características básicas dos sistemas elaborados .....	47
Tabela 1 - Parâmetros do coletor solar .....	52
Tabela 2 - Parâmetros do Módulo PVT .....	52
Tabela 3 - Comparação de resultados de consumo ou ganho de energia para o Sistema 01 .....	59
Tabela 4 - Comparativo entre as pesquisas de referência e o Sistema 02.....	61
Tabela 5 - Comparativo entre a pesquisa de referência e o Sistema 04 .....	62
Tabela 6 – Valores anuais para Belo Horizonte .....	64
Tabela 7 – Valores anuais para Brasília.....	64
Tabela 8 – Valores anuais para Florianópolis .....	65
Tabela 9 – Valores anuais para Recife .....	65
Tabela 10 – Eficiências dos coletores solares dos sistemas .....	67
Tabela 11 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Belo Horizonte/MG.....	70
Tabela 12 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Brasília/DF .....	70
Tabela 13 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Florianópolis/SC .....	71
Tabela 14 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Recife/PE .....	72
Tabela 15 – Variação das temperaturas de banda morta do controlador do loop solar .....	82
Tabela 16 – Variação das temperaturas de banda morta do controlador do loop da bomba de calor.....	83
Tabela A 1 – Dados da bomba de calor Trane EXW 060 para o <i>Type668</i> .....	93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEN	Balanço Energético Nacional
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
NBR	Norma Técnica Brasileira
PV	<i>Photovoltaic system</i>
PVT	<i>Photovoltaic-thermal system</i>
PVT-HP	<i>Photovoltaic-thermal system and Heat Pump</i>
SAS	Sistema de Aquecimento Solar
SDHW	<i>Solar Domestic Hot Water Heating</i>
SAHP	<i>Solar Assisted Heat Pumps</i>
TRNSYS	<i>Transient System Simulation</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	[m <sup>2</sup> ]	Abertura total da matriz de coletores ou área bruta (consistente com $F_R(\tau\alpha)$ , $F_RU_L$ , $F_RU_{LT}$ )
$\alpha$	[-]	Absortância eficaz da célula
$G_{ALB}$	[-]	Albedo
$\gamma_s$	[°]	Ângulo azimutal do Sol
$\theta$	[°]	Ângulo de incidência
$\omega$	[°]	Ângulo horário solar
$\theta_z$	[°]	Ângulo zenital solar
$A_c$	[m <sup>2</sup> ]	Área do coletor
$C_{pf}$	[kJ/kg.K]	Calor específico do fluido do coletor
$CP_{carga}$	[kJ/kg.K]	Calor específico do líquido no lado da carga da bomba de calor
$CP_{fonte}$	[kJ/kg.K]	Calor específico do líquido no lado da fonte da bomba de calor
$Cap_{aquecimento}$	[kJ/h]	Capacidade de aquecimento da bomba de calor nas condições instantâneas do momento de operação
$\dot{m}_{carga}$	[kg/h]	Caudal mássico do líquido no lado da carga da bomba de calor
$\dot{m}_{fonte}$	[kg/h]	Caudal mássico do líquido no lado da fonte da bomba de calor
$COP$	[-]	Coefficiente de desempenho
$U_L$	[kJ/h.m <sup>2</sup> .K <sup>2</sup> ]	Coefficiente de perda térmica geral do coletor por unidade de área

$\beta_r$	[%/K]	Coeficiente de temperatura da célula
$\dot{W}_{HP}$	[kJ/h]	Consumo de energia pela bomba de calor
$\dot{W}_{bomba}$	[kJ/h]	Consumo de energia pelas bombas
$\delta$	[°]	Declinação solar
$U_{L/T}$	[kJ/h.m <sup>2</sup> .K <sup>2</sup> ]	Dependência do coeficiente de perda térmica em T
$\eta_a$	[%]	Eficiência da célula à temperatura ambiente
$\eta_e$	[%]	Eficiência elétrica do painel PVT
$\eta_{global}$	[%]	Eficiência global do painel PVT
$\eta_r$	[%]	Eficiência da célula de referência
$\eta_t$	[%]	Eficiência térmica do painel PVT
$\dot{Q}_{absorvida}$	[kJ/h]	Energia absorvida pela bomba de calor no modo de aquecimento
$F_R$	[-]	Fator de remoção de calor
$F_R$	[-]	Fator geral de eficiência de remoção de calor do coletor
$B$	[°]	Inclinação de uma superfície
$S$	[kJ/m <sup>2</sup> ]	Irradiação absorvida pela superfície absorvedora do coletor PVT
$H_{DIF}$	[W.h/m <sup>2</sup> ]	Irradiação difusa
$H_{DIR}$	[W.h/m <sup>2</sup> ]	Irradiação direta horizontal
$H_N$	[W.h/m <sup>2</sup> ]	Irradiação direta normal
$H_0$	[W.h/m <sup>2</sup> ]	Irradiação extraterrestre
$H$	[W.h/m <sup>2</sup> ]	Irradiação global
$G_{DIF}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Irradiância difusa

$G_{DIR}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Irradiância direta horizontal
$G_N$	[W/m <sup>2</sup> ]	Irradiância direta normal
$G_0$	[W/m <sup>2</sup> ]	Irradiância extraterrestre
$G$	[W/m <sup>2</sup> ]	Irradiância global
$\dot{Q}_{dtanque,perda}$	[kJ/h]	Perda de calor no tanque doméstico
$\dot{Q}_{ftank,perda}$	[kJ/h]	Perda de calor no tanque oscilante
$\dot{P}_{aquecimento}$	[kJ/h]	Potência consumida pela bomba de calor no modo de aquecimento
$I_T$	[kJ/kg.K]	Radiação global incidente no coletor solar (superfície inclinada)
$\dot{Q}_{Aux}$	[kJ/h]	Taxa de energia consumida pelo aquecedor auxiliar
$\dot{Q}_{dtanque,Aux}$	[kJ/h]	Taxa de energia consumida pelos aquecedores auxiliares do tanque doméstico
$\dot{Q}_{ftanque,aux}$	[kJ/h]	Taxa de energia consumida pelos aquecedores auxiliares do tanque oscilante
$\dot{Q}_u$	[kJ/h]	Taxa de energia térmica obtida pelo coletor solar
$\dot{Q}_e$	[kJ/h]	Taxa de energia obtida pelo painel PV
$\dot{E}_{carga,entrada}$	[kJ/h]	Taxa total de energia requerida
$T_o$	[°C]	Temperatura de saída do fluido do coletor
$T_a$	[°C]	Temperatura ambiente (ar)
$T_a$	[°C]	Temperatura ambiente (ar)
$T_{f,i}$	[°C]	Temperatura de entrada do fluido
$T_i$	[°C]	Temperatura de entrada do fluido no coletor

$T_{carga,entrada}$	[°C]	Temperatura do líquido que entra no lado da carga da bomba de calor.
$T_{fonte,entrada}$	[°C]	Temperatura do líquido que entra no lado da fonte da bomba de calor.
$T_{carga,saida}$	[°C]	Temperatura do líquido que sai do lado da carga da bomba de calor.
$T_{fonte,saida}$	[°C]	Temperatura do líquido que sai do lado da fonte da bomba de calor.
T	[-]	Transmitância de ondas curtas da(s) tampa(s) do coletor
$\dot{m}$	[kg/h]	Vazão mássica em condições de uso
$(\tau\alpha)_n$	[-]	$(\tau\alpha)$ em incidência normal

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	Justificativa.....	19
1.2	Objetivo geral.....	20
1.3	Objetivos específicos .....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1	Sistemas convencionais de aquecimento solar de água para uso doméstico ....	21
2.2	Sistema fotovoltaico e térmico – PVT .....	23
2.3	Sistema fotovoltaico e térmico associado a bomba de calor – PVT-HP .....	26
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>30</b>
3.1	Recurso solar.....	30
3.2	Energia solar no Brasil.....	32
3.3	<i>Transient System Simulation</i> – TRNSYS.....	35
3.4	Modelo matemático .....	39
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>46</b>
4.1	Parâmetros gerais dos projetos .....	46
4.1.1	<i>Sistema 01 - Aquecimento elétrico de água.....</i>	<i>48</i>
4.1.2	<i>Sistemas 02 e 03 - Aquecimento solar de água.....</i>	<i>50</i>
4.1.3	<i>Sistemas 04 e 05 - Aquecimento solar de água assistido por bomba de calor indireta de tanque duplo .....</i>	<i>53</i>
4.2	Balço de energia.....	57
4.3	Validação dos projetos simulados .....	58
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>63</b>
5.1.	Comparação entre os sistemas.....	63
5.1.1.	<i>Custo operacional dos sistemas .....</i>	<i>68</i>
5.2.	Desempenho do sistema PVT-HP.....	69

<b>5.2.1 Desempenho térmico e elétrico mensal.....</b>	<b>69</b>
<b>5.2.2 Desempenho térmico e elétrico diário .....</b>	<b>74</b>
<b>5.2.3 Desempenho da bomba de calor e do trocador de calor.....</b>	<b>76</b>
<b>5.2.4 Perdas térmicas nos tanques .....</b>	<b>79</b>
<b>5.3. Influência dos parâmetros do sistema PVT-HP .....</b>	<b>80</b>
<b>5.3.1 Volume dos tanques de armazenamento.....</b>	<b>80</b>
<b>5.3.2 Temperaturas de banda morta superior e inferior nos controladores.....</b>	<b>82</b>
<b>5.3.3 Área do módulo PVT .....</b>	<b>84</b>
<b>5.3.4 Otimização da configuração do PVT-HP.....</b>	<b>85</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>89</b>
<b>APÊNDICE A – Arquivo externo da bomba de calor Trane EXW 060 .....</b>	<b>93</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A utilização da radiação solar para geração de energia tem sido tema de interesse para diversas pesquisas e conta com inúmeras aplicações industriais, agrícolas, comerciais, domésticas, entre outras. A justificativa para esse crescimento é a busca por sistemas mais econômicos e sustentáveis que permitam diminuir os impactos ambientais ocasionados pela alta demanda de energia elétrica.

O campo da utilização da energia solar para geração de energia elétrica e térmica é diverso. Sistemas com essas finalidades estão em constante mudança e aperfeiçoamento visando atender às demandas da sociedade, de forma que sejam viáveis tecnicamente e financeiramente. Para aumentar a eficiência, sistemas híbridos vêm sendo desenvolvidos no campo da energia solar desde a década de 1970, podendo realizar a conversão da radiação solar em mais de uma forma de energia simultaneamente e de forma sequenciada, processo denominado de “cogeração” (KUMAR e ROSEN, 2011).

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). De acordo com Junior e Rodrigues (2018), a utilização dessa configuração reduz a demanda de energia elétrica para a preparação de água quente para uso doméstico.

Segundo Del Amo *et al.* (2019), a associação 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 Brasil apresenta disponibilidade de irradiação solar favorável para aplicações elétricas e térmicas (DO NASCIMENTO, 2019). Isso posto, a elaboração de pesquisas neste campo proporciona o aperfeiçoamento de técnicas, bem como a redução de custos que podem incentivar a utilização em larga escala.

## **1.1 Justificativa**

Devido à demanda cada vez mais alta de energia, ocasionada, principalmente, pelo aumento populacional e pelo crescimento do setor industrial, várias questões vêm sendo levantadas visando garantir que o processo para obtenção dessa energia aconteça de forma limpa e renovável. O Sol é a principal fonte de energia para a Terra e é responsável por praticamente todas as outras fontes de energia existentes. Devido ao seu alto potencial como fonte de energia renovável, as oportunidades para geração de energia a partir da radiação desse astro têm sido tema de debates e desenvolvimento em todo o mundo. Entretanto, no Brasil a utilização da energia solar ainda representa uma pequena parcela, totalizando aproximadamente 1,2% dentre as fontes de energia no país (EPE, 2023).

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 operacionais desses sistemas. Para tanto, são necessários 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.

Estudos aplicados a situações específicas também são importantes para avaliar a viabilidade técnica e financeira desses projetos. De acordo com Junior e Rodrigues (2018), para sistemas PVT com uso de bomba de calor, é necessário analisar usos específicos, uma vez que a eletricidade gerada para o sistema é reduzida pelo uso de forma híbrida.

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. Além disso, é necessário comparar valores referentes aos rendimentos térmico e elétrico desses sistemas em relação

a outros sistemas com finalidade semelhante, a fim de analisar as vantagens e desvantagens dessa implementação.

## 1.2 Objetivo geral

Para a realização deste estudo, assume-se como objetivo geral avaliar a eficiência energética de um sistema de cogeração de energia elétrica e térmica para aquecimento de água para uso doméstico, composto por coletor fotovoltaico e térmico associado a bomba de calor (PVT-HP) de tanque duplo, simulado no TRNSYS, para utilização no Brasil.

## 1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos propostos para este trabalho são:

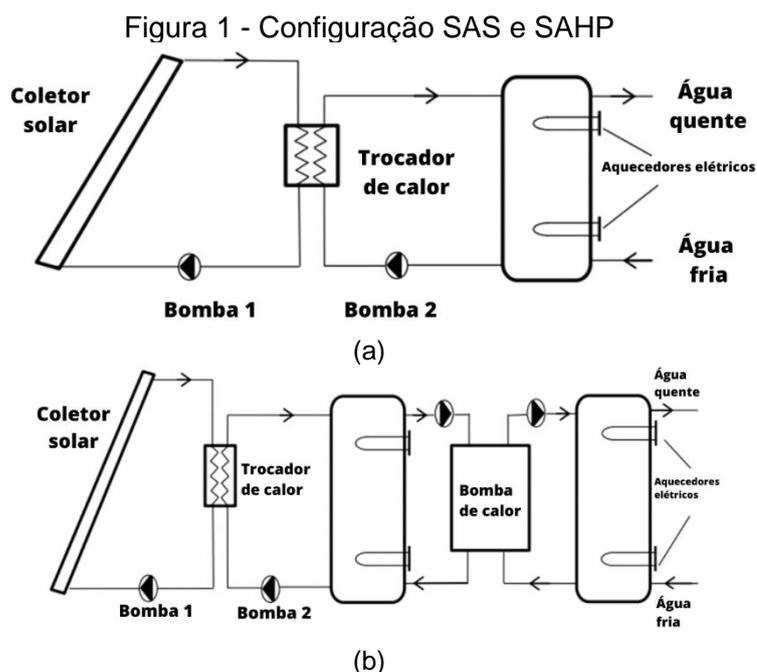
- Modelar sistemas convencionais de aquecimento de água residencial e um sistema fotovoltaico e térmico utilizando bomba de calor (PVT-HP) no *software* TRNSYS e validá-los com outras bibliografias;
- Determinar os rendimentos térmico e elétrico do sistema PVT-HP, mensais e diários em diferentes condições climáticas brasileiras, tais como para as cidades de Belo Horizonte/MG, Brasília/DF, Florianópolis/SC e Recife/PE;
- Comparar a eficiência energética do sistema proposto em relação a configurações de sistemas convencionais de aquecimento solar e água para fins domésticos;
- Avaliar a influência dos parâmetros específicos dos componentes do sistema PVT-HP visando a otimização do projeto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção é dedicada ao levantamento, análise e descrição de publicações científicas no campo da energia solar que se aplicam aos objetivos deste trabalho.

### 2.1 Sistemas convencionais de aquecimento solar de água para uso doméstico

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 recebe a denominação de Sistema de Aquecimento Solar – SAS, de acordo com a NBR 15569:2020 (ABNT, 2020b). 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. Um exemplo desses sistemas é apresentado na Figura 1, que esquematiza a configuração SAS (a) e SAHP (b). Conforme observa-se na figura, ambos os sistemas utilizam tanque para armazenamento da água aquecida utilizando-se a energia solar por meio do coletor térmico. São dispostos aquecedores elétricos que contribuem para que a temperatura almejada seja alcançada na hora da retirada. No SAHP (b) é associada a bomba de calor com o objetivo de reduzir o consumo elétrico pelos aquecedores.



Fonte: Adaptado de Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019).

Um 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 estudo 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 avaliar a capacidade de produção de energia útil em relação à dimensão dos coletores solares, Zukowski e Jezierski (2021) modelaram matematicamente três projetos SAS para as cidades de Madri, Budapeste e Helsinque. Foi observado que a produção anual máxima de energia útil que pode ser obtida a partir de 1m<sup>2</sup> de área bruta de coleta é de 1.303 kW.h no caso de Madri, 918,5 kW.h para Budapeste e 768 kW.h para Helsinque.

O estudo de Banister, Wagar e Collins (2014) tem como objetivo modelar no TRNSYS um projeto de configuração SAHP empregando apenas um tanque de armazenamento de água, validando-o experimentalmente em seguida. Constatou-se concordância forte entre simulação e experimento, com diferenças típicas nas temperaturas médias dos tanques inferiores a 1 °C. Segundo os autores, o modelo do tanque traz alguns problemas, pois a estratificação simulada pode diferir consideravelmente da estratificação experimental.

Estudos visando aquecimento de ambientes também representam uma parcela significativa do estado da arte dos estudos de SAHP e SAS. Li, Sun e Zhang (2014) investigaram o desempenho combinado de um sistema SAHP destinado a aquecimento de água de uso doméstico e para aquecimento de ambientes, para regiões de clima frio. Por meio da pesquisa, nota-se que valores referentes à temperatura de banda morta da bomba de calor, área do coletor, fator de armazenamento, entre outros, são de grande relevante para obtenção de projetos ótimos. O estudo apresenta, que para a bomba de calor de ar-água nas condições avaliadas, a temperatura de banda morta mais apropriada é de 7°C, o fator de armazenamento ideal deve estar dentro da faixa de 0,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> a 0,8 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> e a energia solar a área do coletor é proposta na faixa de 130 m<sup>2</sup> e 160 m<sup>2</sup>.

Já 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. Os autores também apresentam na pesquisa o balanço de energia para cada sistema modelado.

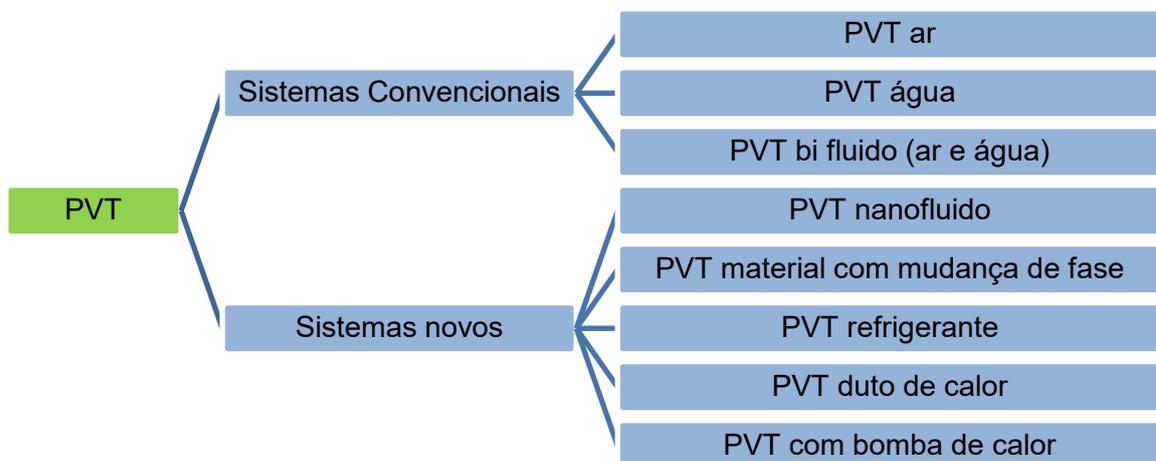
Diante do exposto, nota-se que a implementação de bombas de calor ao sistema é favorável visando diminuir o consumo de energia elétrica. A consideração de fatores referentes às características físicas e de processos são fundamentais para otimizar ganhos térmicos. Na próxima seção será abordada a aplicação de sistemas PVT como sugestão para tornar o sistema híbrido, fornecendo calor e eletricidade para o processo a partir da energia solar.

## 2.2 Sistema fotovoltaico e térmico – PVT

Os sistemas híbridos de geração de energia têm se destacado no campo científico, e um exemplo que vem se aperfeiçoando é o coletor híbrido fotovoltaico térmico – PVT. Com o crescimento constante da demanda energética das edificações, novos sistemas são requeridos para diminuir custos e impactos ambientais.

Segundo Sathe e Dhoble (2017), os sistemas PVT se diferem, principalmente, de acordo com o fluido de transferência utilizado, podendo ser ar, água, ou para os modelos mais recentes, nanofluidos. Os autores classificaram os coletores PVT de acordo com os tipos de sistemas e suas utilizações principais, dividindo em sistemas convencionais e sistemas novos, conforme Figura 2.

Figura 2 - Classificação de sistemas PVT convencionais e novos

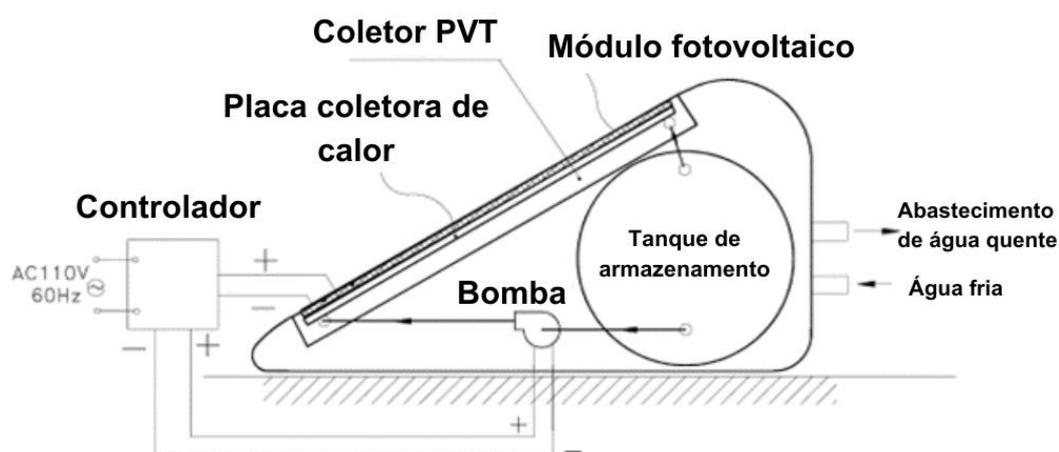


Fonte: Adaptado de Sathe e Dhoble (2017)

A circulação do fluido de trabalho pode ser por convecção forçada por meio de bomba ou por circulação natural devido à diferença de densidade. Segundo Viana (2014), os módulos são basicamente constituídos de células fotovoltaicas montadas sobre uma superfície absorvedora de energia térmica. Parte da radiação solar é absorvida e o calor é transferido para o fluido de trabalho. De acordo com o autor, a eficiência elétrica desse sistema é ampliada, uma vez que o fluido em circulação reduz a temperatura das células solares, que perdem rendimento em função do aumento da temperatura.

Existem diversas configurações para sistemas de PTV água. Huang *et al.* (2001) desenvolveram e avaliaram esse sistema híbrido baseado na estrutura de um termosifão, concluindo que o sistema oferece uma eficiência maior se comparado aos sistemas desassociados. O estudo demonstrou que a eficiência do sistema excedia 60%. É possível entender a estrutura do sistema elaborado pelos autores na Figura 3. O sistema é basicamente composto por um coletor solar térmico de placa plana com a implementação de um módulo fotovoltaico em sua superfície. Por meio do acionamento da bomba, o fluido se desloca pela placa absorvendo calor e resfriando o painel PV. Segundo os autores, novas combinações e diferentes materiais de revestimento poderiam contribuir para aumentar a eficiência e diminuir o custo.

Figura 3 - Esquema do sistema PVT

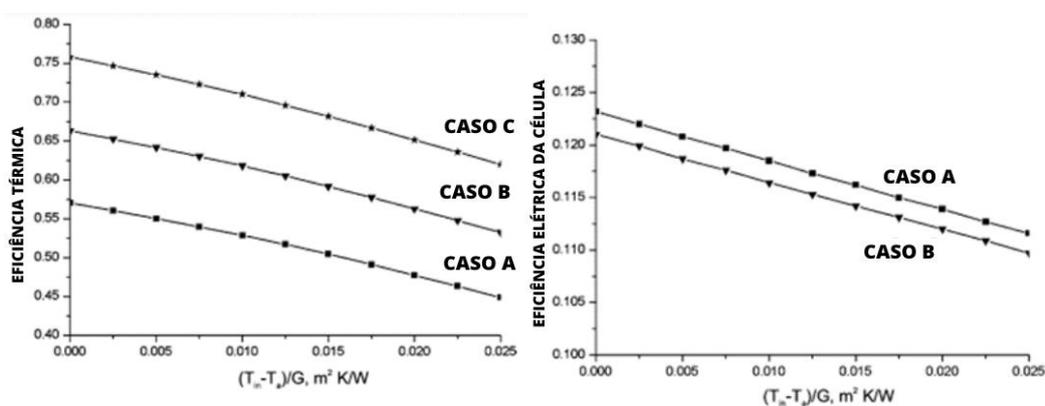


Fonte: Adaptado de Huang et al. (2001)

Como forma de potencializar a geração de calor pelo sistema térmico, Chow, He e Ji (2006) propuseram a elaboração de um coletor PVT tipo caixa plana de liga de alumínio. Para as análises, os autores avaliaram três situações: (A) a superfície do coletor absorvedor totalmente coberta pelo módulo PV; (B) a superfície do absorvedor 50% coberta pelo módulo

PV; e (C) sem módulo PV na superfície do absorvedor. A partir dos resultados, apresentados na Figura 4, observa-se uma proporcionalidade da superfície do coletor solar coberta pelo módulo fotovoltaico em relação à sua capacidade de geração de energia, quanto maior a área coberta, menor a eficiência térmica e maior a eficiência elétrica.

Figura 4 - Eficiência térmica e das células solares de acordo com a disposição do módulo PV na superfície do coletor térmico



Fonte: Adaptado de Chow, He e Ji (2006)

Fraisse *et al.* (2007) analisaram quatro diferentes configurações de sistemas PVT para aplicações prediais, sendo elas: sistema PV e térmico desassociados, sistema híbrido PVT descoberto, sistema PVT híbrido coberto por vidro, e sistema PVT coberto com vidro de baixa emissividade. Foi observado que o sistema coberto por vidro teve a eficiência da célula fotovoltaica 28% menor se comparada a um módulo fotovoltaico convencional não integrado, devido ao aumento na temperatura causada pela cobertura. Todavia, sem a tampa de vidro, a eficiência é 6% maior que um módulo padrão, devido ao efeito de resfriamento. O estudo de Chow *et al.* (2009) analisou seis parâmetros diferentes para avaliar o efeito do envidraçamento do sistema PVT baseado em termossifão, e foi constatado que o envidraçamento é favorável para aumentar a energia térmica ou total. Dessa forma, quando levado em consideração a cobertura do módulo PV, observa-se ganhos no que tange à energia térmica, sendo assim, sugerida para aplicações neste sentido.

Aste, Leonforte e Del Pero (2015) projetaram um sistema PVT envidraçado, feito com tecnologia PV de filme fino e um absorvedor de placa plana *roll-bond*, elaborando um modelo matemático para o sistema térmico e fotovoltaico e validando com a execução do experimento.

Com o objetivo de compreender a influência da diferença da área de cobertura do módulo PVT, Dubey e Tiwari (2008) analisaram três situações de área do coletor solar coberto

por células fotovoltaicas 100%, 50% e 30,56%. Foi constatado que a eficiência térmica instantânea aumenta de 33% para 64% à medida que a área de cobertura fotovoltaica é reduzida de 100% para 30,56%.

Já em relação às características da cobertura dos módulos, Ji *et al.* (2007) projetaram e construíram um sistema PVT utilizando circulação natural de água, com 63% da superfície do coletor coberta por células fotovoltaicas e um envidraçamento frontal de transmissividade de 0,83. O sistema obteve como eficiência elétrica, térmica e energia total diária um total de 10,15%, 45% e 52%, respectivamente.

Para avaliação técnica e econômica, Viana (2014) realizou um estudo experimental de um módulo PVT em operação para o município de Belo Horizonte/MG. Dentre os resultados obtidos, observou-se uma eficiência térmica média do coletor de 33,1% e uma eficiência elétrica média de 6,8%. Segundo o autor, para haver retorno do valor investido para implementação do projeto, seriam necessários aproximadamente 4 anos.

Yazdanpanahi, Sarhaddi e Adeli (2015) realizaram um estudo numérico e experimental com o objetivo de investigar a eficiência exergética de um sistema PVT. O módulo fotovoltaico de silício monocristalino de 90 W foi utilizado para o experimento. A pesquisa considerou a queda de pressão nos tubos de fluxo e foi constatado uma eficiência máxima de 13,95% para a taxa de fluxo de massa ideal de 0,002 kg/s.

Liang, Zhang e Zhou (2015) modelaram no TRNSYS e avaliaram o desempenho de um projeto de aquecimento solar contendo um módulo PVT de 32 m<sup>2</sup>. Foi constatado que o sistema pode atingir uma potência anual de 131 kWh de energia elétrica. Além disso, O ganho de calor do sistema entre 00:00 e 18:00 em um dia típico, quando a fonte de calor auxiliar não está ligada, pode atender à demanda de carga.

### **2.3 Sistema fotovoltaico e térmico associado a bomba de calor – PVT-HP**

Um dispositivo que pode ser integrado ao sistema PVT são as bombas de calor. Segundo Sathe e Dhoble (2017), alguns estudos têm sido realizados nesse campo, principalmente avaliando técnicas de imersão para sistemas fotovoltaicos e resfriamento de refrigerante em sistemas PVT, todavia, ainda há muito a ser analisado. Bomba de calor é um dispositivo que transfere energia de uma fonte de baixa temperatura para um dissipador de temperatura mais alta, podendo ser utilizado para aquecimento ou resfriamento, sendo composta, basicamente, por evaporador, compressor, condensador e válvula de expansão (ÇENGEL e BOLES, 2013).

A pesquisa de Lämmle *et al.* (2017) analisou quatro configurações de sistemas PVT, sendo um deles integrado a bomba de calor. O objetivo do estudo foi comparar sistematicamente coletores não envidraçados, envidraçados e PVT com revestimento de baixa emissividade, sendo que, estes sistemas foram analisados em situações diferentes: (a) sistema de bomba de calor solar em uma casa unifamiliar; (b) água quente sanitária em uma casa multifamiliar; (c) água quente doméstica em uma casa unifamiliar; e (d) sistema combinado em uma habitação unifamiliar. O estudo simulou os sistemas para a cidade de Würzburg ao longo de um ano. A partir dos resultados é observado que enquanto os coletores PVT não envidraçados alcançam altos rendimentos elétricos, os coletores PVT envidraçados com revestimentos de baixa emissividade alcançam altos rendimentos térmicos. Além disso, altas temperaturas de operação são desfavoráveis para coletores PVT, pois reduzem os rendimentos elétrico e térmico. Em relação às configurações, observou-se que sistemas de baixa temperatura, como sistemas de bomba de calor ou residências multifamiliares com baixas frações solares prometem os maiores rendimentos específicos para todas as tecnologias de coletores.

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 kW.h/ano dos 13.771 kW.h). A análise econômica indicou um período de retorno de cerca de seis anos.

Zhou *et al.* (2019) realizaram uma pesquisa experimental de um sistema PVT-HP, utilizando a tecnologia de evaporadores *roll-bond*, usando refrigerante como fluido de trabalho que pode gerar energia térmica e energia elétrica simultaneamente. O sistema experimental projetado é composto por 4 unidades RB-PVT, 1 unidade de bomba de calor HP e tanque de armazenamento de calor de 150 L, que também é equipado com vários sensores de monitoramento para explorar as características operacionais do sistema. Os resultados da pesquisa apontam uma geração diária de energia térmica cumulativa de 5,5 kW.h, potência de geração de calor de 4,7 kW, eficiência fotovoltaica de 11,8%, geração de energia acumulada diária em dias ensolarados de 2 kW.h e em dias nublados de 1,5 kW.h.

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 acrescentando um dispositivo de armazenamento de energia elétrica, que armazena o excesso de energia elétrica produzida e disponibiliza-a à bomba de calor quando necessário.

Lu *et al.* (2020) apresentaram um sistema de refrigeração para ser utilizado em noites de verão, tendo como configuração o PVT-HP. Os resultados experimentais indicam que o sistema é capaz de refrigerar de forma estável na noite de verão, com um COP médio variando de 1,8 a 2,1. Além disso, o desempenho de dissipação de calor dos módulos PVT também apresentou resultados satisfatórios, com um fluxo de dissipação de calor híbrido médio de aproximadamente 420 W/m<sup>2</sup>.

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 a 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 kW.h 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.

Zhang *et al.* (2022) propuseram um sistema de bomba de calor PVT de expansão direta em larga escala (DX-PVT-HP), com uma área de instalação de painéis solares de 32,47 m<sup>2</sup>. Os dados comprovaram que durante a operação da bomba de calor, o efeito do resfriamento do evaporador proporciona resfriamento na placa que oferece um aumento de 25% em comparação com o painel solar convencional. No processo de aquecimento de 1500 L de água de 5,5 °C a 45 °C em um dia ensolarado, o coeficiente médio de desempenho (COP) do sistema chega a 4,96, e a geração de energia do sistema é maior que o consumo de energia.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção é dedicada a exposição do conteúdo teórico relacionado ao tema desta pesquisa. São apresentados conhecimentos referentes à energia solar, funcionalidades do *software* TRNSYS e, por fim, os modelos matemáticos que serão utilizados nos projetos elaborados por este estudo.

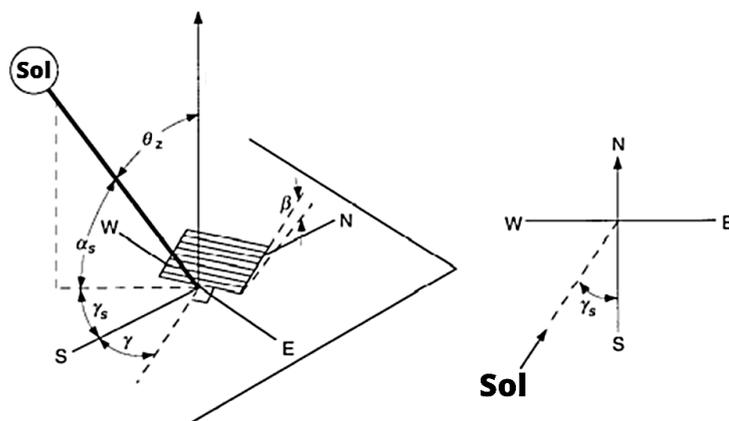
#### 3.1 Recurso solar

É possível afirmar que a incidência diária de energia solar na superfície da Terra corresponde a um valor maior se comparado a quantidade de energia consumida por todos os habitantes ao longo de um ano. De acordo com Duffie e Beckman (2013), o Sol possui uma temperatura efetiva de corpo negro de 5.777 K e, em seu interior a temperatura estimada varia entre  $8 \times 10^6$  K e  $40 \times 10^6$  K. A radiação emitida é proveniente de contínuas reações de fusão, que tornam possível considerar o Sol um reator de fusão contínua por seus gases constituintes, sendo contidos por energia gravitacional.

Para analisar e conhecer os parâmetros de disponibilidade energética proveniente do Sol, é imprescindível compreender a relação com conceitos astronômicos. Segundo Duffie e Beckman (2013), a distância entre Terra-Sol é de  $1,495 \times 10^{11}$  m, variando ao longo do ciclo anual cerca de  $\pm 1,7\%$ . Dessa forma, a radiação solar incidente na Terra também sofre variação ao longo deste período. Segundo os autores, é definida como constante solar a energia vinda do sol por unidade de tempo em uma unidade de área de superfície perpendicular de propagação em relação à média da distância Sol-Terra. De acordo com NREL (2022), o valor da constante solar é igual a  $1366 \text{ W/m}^2$ .

Para compreender a influência do movimento da Terra em torno do seu próprio eixo em relação a radiação solar diária sobre um ponto, é necessário compreender alguns conceitos definidos geometricamente, como os ângulos observados na Figura 5. Por meio da compreensão destes termos é possível descrever numericamente a variabilidade diária e sazonal do Sol (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

Figura 5 - Ângulos notáveis em solarimetria



Fonte: Duffie e Beckman (2013)

Para a compreensão desses ângulos, utilizou-se como referência a NBR 10.899 ABNT (2020a), que define padrões brasileiros dos principais termos técnicos relativos à conversão de energia solar fotovoltaica, como citados a seguir:

- **inclinação de uma superfície ( $\beta$ ):** ângulo de menor declive entre a superfície e o plano horizontal, com faixa de variação  $0^\circ \leq \beta \leq +90^\circ$ ;
- **declinação solar ( $\delta$ ):** ângulo de vértice no centro da Terra, formados pelas semirretas definidas pela direção do Sol e pelo plano do Equador, com faixa de variação  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$  e, por convenção, positivo quando estiver no hemisfério norte;
- **ângulo horário solar ( $\omega$ ):** ângulo diedro com aresta no eixo de rotação da Terra formado pelo semiplano que contém o Sol e o semiplano que contém o meridiano local, com faixa de variação de  $-180^\circ \leq \omega \leq +180^\circ$  e, por convenção, positivo no período da tarde;
- **ângulo de incidência ( $\theta$ ):** ângulo entre o raio solar incidente (direção do Sol) e a reta normal à superfície;
- **ângulo zenital solar ( $\theta_z$ ):** ângulo entre o raio solar incidente e a vertical; e
- **ângulo azimutal do Sol ( $\gamma_s$ ):** ângulo entre o norte geográfico e a projeção do raio solar no plano horizontal, com faixa de variação de  $-180^\circ \leq \gamma_s \leq +180^\circ$  e, por convenção, positivo no sentido leste, com norte igual a  $0^\circ$ .

Segundo Duffie e Beckman (2013), a irradiância solar ( $W/m^2$ ) que incide sobre uma superfície é composta por suas componentes diretas e difusas. Para a compreensão das terminologias, segue a definição apresentada por ABNT (2020a):

- **albedo ( $G_{ALB}$ ):** índice relativo à fração da potência radiante solar, recebida em uma unidade de área, devido à refletância dos arredores e do solo onde está instalado um dispositivo;
- **irradiância extraterrestre ( $G_0$ ):** potência incidente por unidade de área em uma superfície horizontal imaginária no topo da atmosfera;
- **irradiância global ( $G$ ):** potência incidente por unidade de área em uma superfície horizontal;
- **irradiância difusa ( $G_{DIF}$ ):** potência incidente por unidade de área em uma superfície horizontal decorrente do espalhamento do feixe solar extraterrestre pelos constituintes atmosféricos;
- **irradiância direta horizontal ( $G_{DIR}$ ):** potência incidente por unidade de área em uma superfície horizontal decorrente do feixe solar direto; e
- **irradiância direta normal ( $G_N$ ):** potência incidente por unidade de área em uma superfície perpendicular ao feixe com visada direta ao Sol.

Outro conceito importante é a irradiação solar ( $W.h/m^2$ ), que pode ser definida como a integral da irradiância em função do tempo ou energia radiante em função do tempo, no caso da integral ao longo de um dia, a simbologia adotada é  $H_0$ ,  $H$ ,  $H_{DIF}$ ,  $H_{DIR}$  e  $H_N$ , respectivamente (ABNT, 2020a).

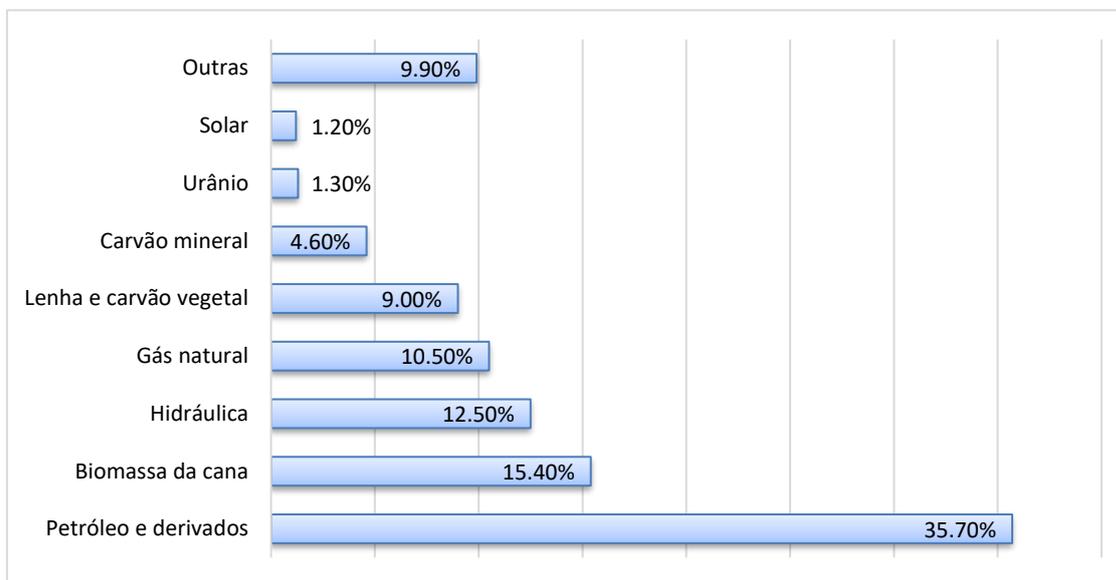
### 3.2 Energia solar no Brasil

O estudo de Do Nascimento *et al.* (2019) aponta que, mesmo com as atenuações ocasionadas pela interação da radiação solar com elementos da atmosfera, pesquisas realizadas no território brasileiro demonstraram valores de irradiância global horizontal de até  $1845 W/m^2$ , medido no município de Caucaia/CE. Esse fenômeno é denominado sobreirradiância solar, e ocorre por um efeito comumente chamado de efeito de aumento de nuvem ou efeito de borda de nuvem, permitindo que o valor de irradiância ultrapasse o valor da constante solar.

Embora seja grande o potencial de utilização da energia solar, esta representa uma parcela pequena entre as fontes utilizadas no Brasil. De acordo com o publicado no Balanço Energético Nacional – BEN (EPE, 2023), referente ao ano base 2022, no país as principais

fontes de energia utilizadas são: petróleo e derivados, biomassa de cana, hidráulica e gás natural, conforme observa-se na Figura 6.

Figura 6 – Fontes de energias utilizadas no Brasil



Fonte: Adaptado de (EPE, 2023)

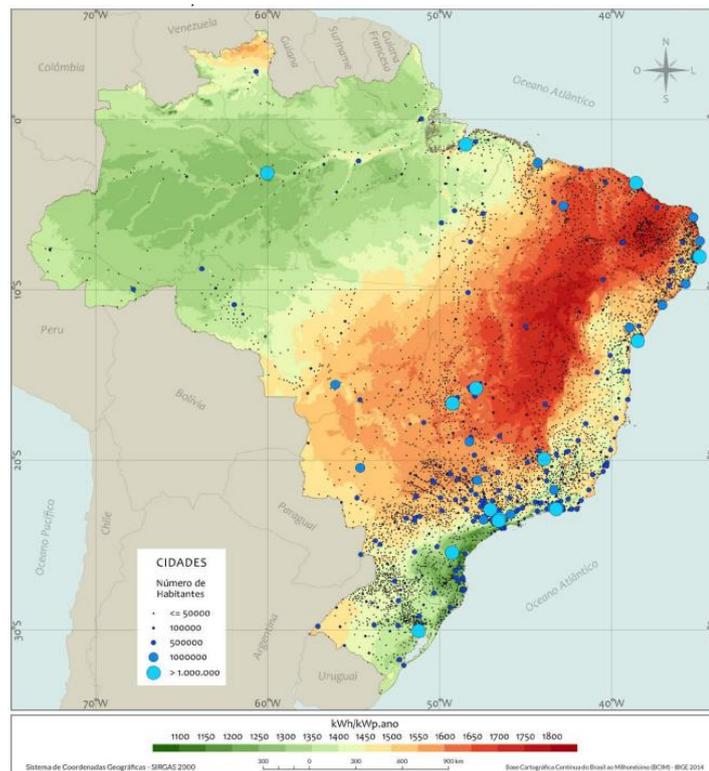
O Brasil apresenta uma matriz energética diversificada, porém, o uso de fontes não renováveis ainda prevalece, representando 52,6% da Oferta Interna de Energia – OIE (EPE, 2023). O país emitiu no ano de 2022, cerca de 423 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO<sub>2-eq</sub>), associado à matriz energética, totalizando aproximadamente 1,9 t CO<sub>2-eq</sub> por habitante. Todavia, é importante analisar que o país apresenta um índice menor de emissões se comparado com países da União Europeia e EUA, segundo o relatório um habitante brasileiro emitiu 1/7 das emissões de um americano (EUA) e 1/3 de um cidadão europeu (EPE, 2023).

Entretanto, é relevante observar que a geração de energia elétrica por meio da fonte solar fotovoltaica apresentou um aumento significativo no país. O relatório apresenta que o crescimento da utilização dessa fonte de energia foi de 79,8%, comparando o ano de 2022 ao de 2021, representando um aumento de 13.374 GWh (EPE, 2023).

Esse crescimento da utilização de energia solar é consequência do investimento predominante na instalação de painéis fotovoltaicos como principal fonte de Micro e Minigeração Distribuída – MMGD, principalmente em residências. O consumo de energia em residências representa 10,7% do total no país, ficando atrás da indústria, transportes e do setor energético (EPE, 2023).

É apresentado na Figura 7 o potencial de geração solar fotovoltaica em termos do rendimento energético anual para todo o Brasil (medido em kW.h/kWp.ano no perfil de cores), admitindo uma taxa de desempenho de 80% para geradores fotovoltaicos fixos e distribuição da população brasileira nas cidades (PEREIRA *et al.*, 2017).

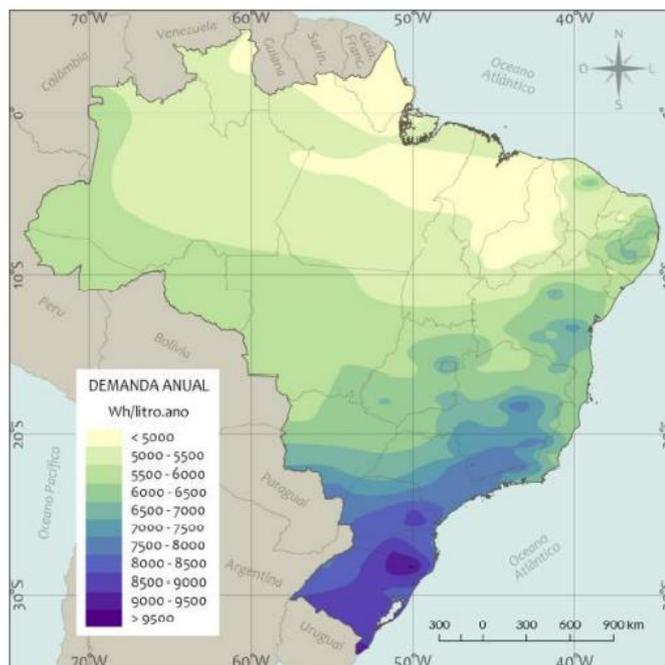
Figura 7 - Potencial de geração fotovoltaica média anual em todo território brasileiro



Fonte: Pereira *et al.* (2017)

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, o uso da energia solar para aquecimento de água a temperaturas abaixo de 100°C é, atualmente, a aplicação mais difundida no Brasil, sendo uma alternativa a sistemas de aquecimento elétrico (chuveiros) ou a gás (PEREIRA *et al.*, 2017). É possível observar na Figura 8 a demanda de energia térmica por litro de água aquecida a 40°C no Brasil. É perceptível que a necessidade não acompanha a incidência de irradiação solar, pois a demanda térmica é maior em regiões de clima mais frio.

Figura 8 – Demanda de energia térmica no Brasil



Fonte: Pereira *et al.* (2017).

Isto posto, nota-se que a utilização da energia solar térmica no Brasil ainda representa uma parcela pequena se comparada às demais fontes energéticas, embora o país apresente altos níveis de irradiância solar em todo o seu território. Dessa forma, estudos para compreender as oportunidades para o aproveitamento da energia solar representam um incentivo para a implementação dessas tecnologias no país.

### 3.3 *Transient System Simulation* – TRNSYS

*Transient System Simulation* - TRNSYS é um *software* de simulação de processos térmicos modulares amplamente utilizado. Embora inicialmente tenha sido desenvolvido para aplicações de energia solar, se tornou muito aplicado a simulações de processos térmicos diversos (DUFFIE e BECKMAN, 2013). Segundo Sathe e Dhoble (2017), a simulação é uma ferramenta muito importante e oferece a possibilidade de reduzir custos de experimentos possibilitando a análise de diferentes configurações.

Segundo Duffie e Beckman (2013), o programa possui uma lista de componentes e combinações em sua biblioteca, além de permitir que o usuário crie suas próprias sub-rotinas de componentes para atender às necessidades do projeto. Os componentes no *software* são

“conectados” de maneira análoga à tubulação, dutos e fiação de um sistema físico. O programador também fornece valores para todos os parâmetros que descrevem os componentes a serem usados. O *software* realiza as soluções simultâneas necessárias das equações algébricas e diferenciais que representam os componentes e organiza as entradas e saídas. Vários níveis de complexidade podem ser usados no cálculo.

Os componentes disponibilizados para elaboração dos sistemas são denominados “*Types*”, que possuem numeração, parâmetros e valores de entrada e saída próprios. Exemplos desses componentes são explicados no Quadro 1.

Quadro 1 - *Types* no TRNSYS (continua)

<b>Figura</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Descrição</b>
 Type14b	<i>Time Dependent Forcing Function: Water Draw</i> (Função de forçamento dependente do tempo: extração de água)	Define o perfil de extração de água quente, é o componente em que são especificados os horários e o fluxo de massa da água.
 Type11b	<i>Tempering Valve</i> (Válvula Misturadora Termostática)	Permite ajustar a temperatura do fluido de acordo com valor pré-estabelecido.
 Type4c	<i>Storage Tank; Variable Inlets, Uniform Losses</i> (Tanque de armazenamento; Entradas Variáveis, Perdas Uniformes)	Modela um tanque de armazenamento térmico estratificado em nós.

Quadro 1 - *Types* no TRNSYS (continua)

<b>Figura</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Descrição</b>
 Type11h	<i>Tee Piece</i> (Conector em T)	Peça de conexão em T.
 Type6	<i>Auxiliary Heater</i> (Aquecedor Auxiliar)	Eleva a temperatura de um fluxo usando controle interno, controle externo ou uma combinação de ambos os tipos de controle.
 Type2b	<i>ON/OFF Differential Controller</i> (Controlador Diferencial ON/OFF)	Gera uma função de controle de ligado (1) ou desligado (0). Esse sinal é escolhido de acordo com a diferença de temperatura superior ( $T_h$ ) e inferior ( $T_l$ ), em comparação com duas diferenças de banda morta.
 Type5b	<i>Counter Flow Heat Exchanger</i> (Trocador de Calor de Contra-fluxo)	Trocador de calor sensível a capacitância zero em contracorrente. Dadas as temperaturas de entrada do lado quente e frio e as taxas de fluxo, a eficácia é calculada para um determinado valor fixo do coeficiente global de transferência de calor.
 Type3b	<i>Pump</i> (Bomba)	Esse modelo de bomba calcula a vazão mássica usando uma função de controle variável e uma capacidade de vazão máxima fixa.
 Type50d	<i>PV-Thermal Collector</i> (Coletor Fotovoltaico e Térmico)	Este <i>Type</i> complementa o <i>Type1b</i> (coletor solar), adicionando um módulo fotovoltaico ao coletor de placa plana padrão.

Quadro 1 - *Types* no TRNSYS (conclusão)

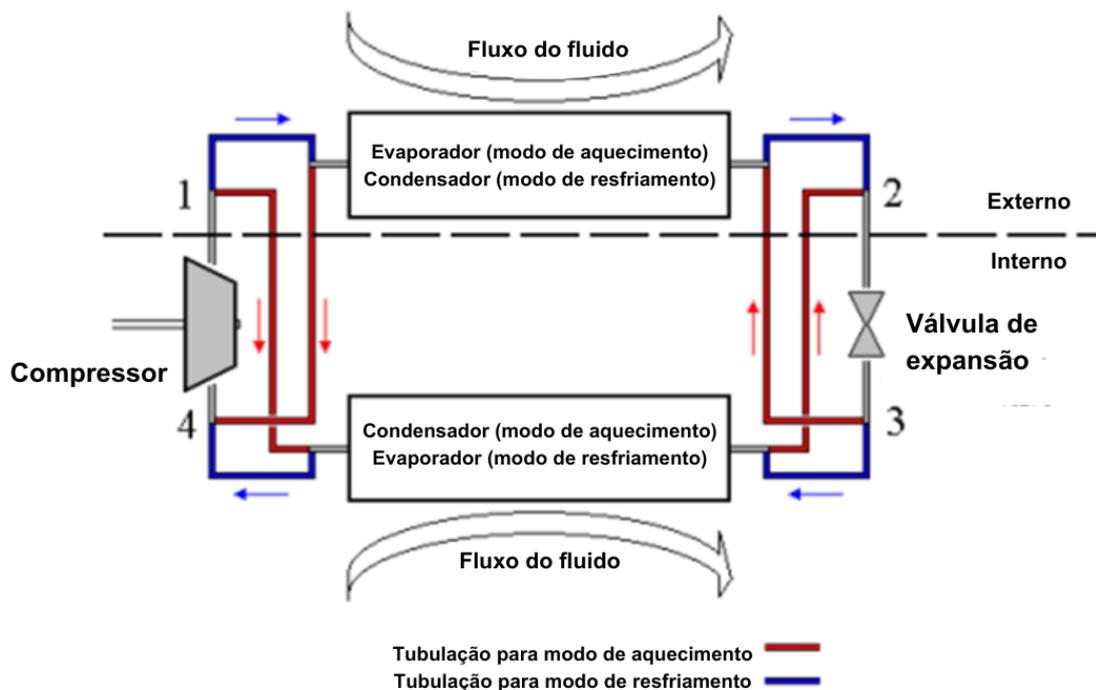
Figura	Nomenclatura	Descrição
 Type1b	<i>Solar Collector;</i> <i>Quadratic Efficiency,</i> <i>2nd Order Incidence</i> <i>Angle Modifiers</i> (Coletor solar; Eficiência quadrática, modificadores de ângulo de incidência de 2ª ordem)	Esse componente modela o desempenho térmico de um coletor solar de placa plana.
 Type109-TMY2	<i>Data Reader and</i> <i>Radiation Processor</i> (Leitor de dados e processamento de radiação)	Responsável por ler os dados climáticos em intervalos regulares de um arquivo externo de dados, convertendo-os em um sistema desejado de unidades e processando os dados de radiação solar para obter radiação superficial inclinada e ângulo de incidência para um número arbitrário de superfícies
 Type668	<i>Water to Water Heat</i> <i>Pump</i> (Bomba de calor água/água)	Esse <i>Type</i> atua no controle do nível da temperatura, quando o sinal de controle definido pelo usuário indica que a unidade deve estar ativada no modo de aquecimento ou resfriamento, ele opera no nível da capacidade até que os valores do sinal de controle mudem.
 Type65c	<i>Online graphical plotter</i> <i>with output file</i> (Plotadora gráfica on- line com arquivo de saída)	Usado para exibir variáveis de sistema selecionadas enquanto a simulação está progredindo.

Fonte: Adaptado de TRNSYS (2006) e TESS (2004).

### 3.4 Modelo matemático

No *Type668* é utilizado um modelo matemático de uma bomba de calor de estágio único (água/água), composta por evaporador, condensador, válvula de expansão e compressor, conforme diagrama esquemático apresentado na Figura 9. Para que o componente opere, é necessário inserir um arquivo de dados externo fornecido pelo usuário contendo dados de catálogo para a capacidade e consumo de energia, com base na carga de entrada e nas temperaturas da fonte.

Figura 9 - Modelo esquemático de bomba de calor (água/água)



Fonte: Adaptado de TESS (2004).

Quando a bomba de calor é definida para operar no modo de aquecimento, o componente acessa o arquivo de dados de desempenho de aquecimento e retorna com a capacidade de aquecimento e o consumo de energia da máquina. O Coeficiente de Performance (COP) é dado pela Eq. (1) (TESS, 2004).

$$COP = \frac{Cap_{aquecimento}}{\dot{P}_{aquecimento}} \quad (1)$$

Sendo:

$COP$	[-]	Coeficiente de desempenho
$Cap_{aquecimento}$	[kJ/h]	Capacidade de aquecimento da bomba de calor nas condições instantâneas do momento de operação
$\dot{P}_{aquecimento}$	[kJ/h]	Potência consumida pela bomba de calor no modo de aquecimento

A quantidade de energia absorvida da corrente de fluido de origem no aquecimento é dada pela Eq. (2) (TESS, 2004).

$$\dot{Q}_{absorvida} = Cap_{aquecimento} - \dot{P}_{aquecimento} \quad (2)$$

Sendo:

$\dot{Q}_{absorvida}$	[kJ/h]	Energia absorvida pela bomba de calor no modo de aquecimento
-----------------------	--------	--

As temperaturas de saída das duas correntes líquidas, *source* e *load*, que correspondem ao lado da fonte de aquecimento e o lado em que o fluido será aquecido pelo líquido da fonte, respectivamente, podem ser calculadas usando a Eq. (3) e Eq. (4) (TESS, 2004).

$$T_{fonte,saida} = T_{fonte,entrada} - \frac{\dot{Q}_{absorvida}}{\dot{m}_{fonte} CP_{fonte}} \quad (3)$$

$$T_{carga,saida} = T_{carga,entrada} - \frac{Capaquecimento}{\dot{m}_{carga} CP_{carga}} \quad (4)$$

Sendo:

$CP_{carga}$	[kJ/kg.K]	Calor específico do líquido no lado da carga da bomba de calor
$CP_{fonte}$	[kJ/kg.K]	Calor específico do líquido no lado da fonte da bomba de calor
$\dot{m}_{carga}$	[kg/h]	Caudal mássico do líquido no lado da carga da bomba de calor
$\dot{m}_{fonte}$	[kg/h]	Caudal mássico do líquido no lado da fonte da bomba de calor
$T_{carga,entrada}$	[°C]	Temperatura do líquido que entra no lado da carga da bomba de calor.
$T_{carga,saida}$	[°C]	Temperatura do líquido que sai do lado da carga da bomba de calor.
$T_{fonte,entrada}$	[°C]	Temperatura do líquido que entra no lado da fonte da bomba de calor.
$T_{fonte,saida}$	[°C]	Temperatura do líquido que sai do lado da fonte da bomba de calor.

No *Type1b* é modelado o desempenho térmico de um coletor solar de placa plana, determinado pelo número de módulos em série e pelas características de cada módulo (TRNSYS, 2006). Uma equação geral para a eficiência do coletor solar térmico pode ser obtida a partir da Eq. (5), de Hottel-Whillier (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

$$\eta_T = \frac{Q_u}{AI_T} = \frac{\dot{m}C_{pf}(T_o - T_i)}{AI_T} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \quad (5)$$

Sendo:

A	[m <sup>2</sup> ]	Abertura total da matriz de coletores ou área bruta (consistente com $F_R(\tau\alpha)$ , $F_R U_L$ , $F_R U_{L/T}$ )
$C_{pf}$	[kJ/kg.K]	Calor específico do fluido do coletor
$F_R$	[-]	Fator geral de eficiência de remoção de calor do coletor
$I_T$	[kJ/h.m <sup>2</sup> ]	Radiação global incidente no coletor solar (superfície inclinada)
$\dot{m}$	[kg/h]	Vazão em condições de uso
$T_a$	[°C]	Temperatura ambiente (ar)
$T_i$	[°C]	Temperatura de entrada do fluido no coletor
$T_o$	[°C]	Temperatura de saída do fluido do coletor
$U_L$	[kJ/h.m <sup>2</sup> .K <sup>2</sup> ]	Coeficiente de perda térmica geral do coletor por unidade de área
$\alpha$	[-]	Absorvância de ondas curtas da placa absorvedora
$\tau$	[-]	Transmitância de ondas curtas da(s) tampa(s) do coletor
$(\tau\alpha)_n$	[-]	$(\tau\alpha)$ em incidência normal

Segundo TRNSYS (2007), o coeficiente de perda  $U_L$  não é exatamente constante, dessa forma, a Eq. (6) é mais adequada, pois leva em consideração uma dependência linear de  $U_L$  versus  $(T_i - T_a)$ .

$$\eta_T = \frac{Q_u}{AI_T} = \frac{\dot{m}C_{pf}(T_o - T_i)}{AI_T} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} - F_R U_{L/T} \frac{(T_i - T_a)^2}{I_T} \quad (6)$$

Sendo:

$U_{L/T}$  [kJ/h.m<sup>2</sup>.K<sup>2</sup>] Dependência do coeficiente de perda térmica em T

O coletor híbrido PVT (*Type50d*) corresponde a um suplemento ao *Type 1* (coletor solar), em que é acrescido um módulo fotovoltaico ao coletor de placa plana padrão. Esse *Type* foi desenvolvido usando as equações de Hottel -Whillier -Bliss baseadas no trabalho de Florschuetz (TRNSYS, 2006). A saída térmica do *Type50d* é calculada pela Eq. (7) (FLORSCHUETZ, 1979).

$$Q_u = A_C F_R [S - U_L (T_{f,i} - T_a)] \quad (7)$$

Sendo:

$A_C$	[m <sup>2</sup> ]	Área do coletor
$F_R$	[-]	Fator de remoção de calor
$S$	[kJ/m <sup>2</sup> ]	Irradiação absorvida pela superfície absorvedora do coletor PVT
$T_{f,i}$	[°C]	Temperatura de entrada do fluido
$T_a$	[°C]	Temperatura ambiente (ar)
$U_L$	[kJ/h.m <sup>2</sup> .K <sup>2</sup> ]	Coeficiente de perda térmica geral do coletor por unidade de área

A saída elétrica do sistema é calculada por meio da Eq. (8) (FLORSCHUETZ, 1979).

$$Q_e = \frac{A_C S \eta_a}{\alpha} \left\{ 1 - \frac{\eta_r \beta_r}{\eta_a} \left[ F_R (T_{f,i} - T_a) + \frac{S}{U_L} (1 - F_R) \right] \right\} \quad (8)$$

Sendo:

$\beta_r$	[%/K]	Coeficiente de temperatura da célula
$\eta_a$	[%]	Eficiência da célula à temperatura ambiente
$\eta_r$	[%]	Eficiência da célula de referência
$T_a$	[°C]	Temperatura ambiente (ar)
A	[-]	Absorvância eficaz da célula

O cálculo da eficiência elétrica do painel PVT é realizado pela Eq. (9) (KOŞAN e AKTAŞ, 2021).

$$\eta_e = \frac{Q_e}{AI_T} \quad (9)$$

A Eq. (10) é utilizada para determinar a eficiência global do painel PVT (KOŞAN e AKTAŞ, 2021).

$$\eta_{global} = \eta_e + \eta_T \quad (10)$$

A Eq. (11) é utilizada para realizar o balanço de energia da configuração SAS.

$$\dot{Q}_{dtanque,Aux} + \dot{Q}_{Aux} + Q_u + \dot{W}_{bomba} = \dot{E}_{carga,entrada} + \dot{Q}_{dtanque,perda} \quad (11)$$

Sendo:

$\dot{Q}_u$	[kJ/h]	Taxa de energia solar obtida
$\dot{W}_{bomba}$	[kJ/h]	Consumo de energia pelas bombas
$\dot{E}_{carga,entrada}$	[kJ/h]	Taxa total de energia requerida
$\dot{Q}_{dtanque,Aux}$	[kJ/h]	Taxa de energia consumida pelos aquecedores auxiliares do tanque doméstico
$\dot{Q}_{Aux}$	[kJ/h]	Taxa de energia consumida pelo aquecedor auxiliar
$\dot{Q}_{dtanque,perda}$	[kJ/h]	Perda de calor no tanque doméstico

Já o balanço de energia para o sistema SAHP pode ser realizado, de acordo com Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019), pela Eq. (12).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{dtanque,Aux} + \dot{Q}_{ftanque,Aux} + \dot{Q}_{Aux} + \dot{Q}_u + \dot{W}_{bomba} + \dot{W}_{HP} \\ = \dot{E}_{carga,entrada} + \dot{Q}_{dtanque,perda} + \dot{Q}_{ftanque,perda} \end{aligned} \quad (12)$$

Sendo:

$\dot{Q}_{ftanque,aux}$	[kJ/h]	Taxa de energia consumida pelos aquecedores auxiliares do tanque oscilante
$\dot{Q}_{ftanque,perda}$	[kJ/h]	Perda de calor no tanque oscilante
$\dot{W}_{HP}$	[kJ/h]	Consumo de energia pela bomba de calor

## 4 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* Nova Gameleira do CEFET-MG. A máquina utilizada para as simulações tem as seguintes especificações técnicas: processador Intel (R) Core (TM) i5-7200U, CPU 2.50 GHz, 2.71 GHz, 8 GB RAM. O tempo de simulação variou entre 6min e 12min, para o período de simulação pré-definido no *software* (1 ano). O fluxograma das etapas para alcançar os objetivos desta seção está demonstrado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia



Fonte: o autor.

### 4.1 Parâmetros gerais dos projetos

Foram elaborados cinco sistemas com diferentes configurações para fins de comparação e avaliação, conforme descrito no Quadro 2. As características de cada sistema estão pormenorizadas nos tópicos subsequentes.

Quadro 2 - Características básicas dos sistemas elaborados

Sistema	Configuração	Energia solar	Fotovoltaico	Térmico	Bomba de calor
01	Elétrico				
02	SAS	X		X	
03	PVT	X	X	X	
04	SAHP	X		X	X
05	PVT-HP	X	X	X	X

Fonte: o autor.

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.

Primeiramente, foi necessário definir parâmetros iniciais, como os fluxos de massa de tiragem de água ao longo dia em uma residência no Brasil. No país, o aquecimento de água é comumente aplicado para banho. Dessa forma, estipulou-se quatro retiradas de água quente a uma temperatura de 55 °C, durante 15 minutos, a uma vazão mássica de 300 kg/h, nos seguintes horários: 06 h, 08 h, 20 h, 22 h. Embora não sejam necessariamente realísticos, esses valores serão 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.

As simulações para todos os projetos 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, com inclinação direcionada ao norte.

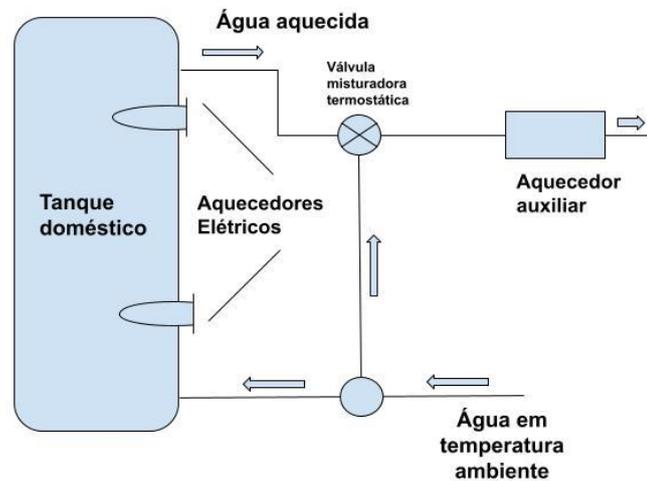
O tanque doméstico de água modelado para todos os sistemas possui 350 L, altura de 1,2 m, é estratificado, com perdas uniformes e valores de entrada variáveis. Para a estratificação, o tanque é dividido em 10 (dez) nós de mesma dimensão para que seja modelada uma variação de temperatura ao longo do tanque e, assim, se aproxime da realidade. Existem dois aquecedores auxiliares de 2 kW. 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 valores do ponto de ajuste para cada aquecedor variam de acordo com o sistema, dessa forma, serão especificados adiante. O coeficiente de perda global uniforme para os tanques foi definido como  $0,833 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . 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 ( $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ), foi usada uma válvula misturadora termostática, que atuou quando a temperatura da água no topo do tanque doméstico estava acima desse ponto de ajuste. Nesse caso, a válvula misturada libera água da rede, a temperatura ambiente, para esfriar a água que foi 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 de 2 kW foi instalado após a válvula misturadora. O parâmetro “temperatura ambiente” dos tanques e do aquecedor auxiliar foi definido com base no arquivo climático da cidade analisada, disponibilizado pelo software TRNSYS.

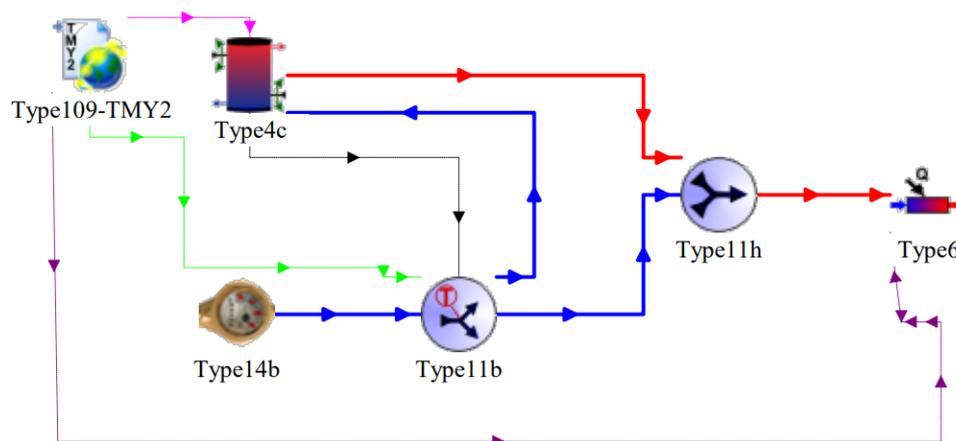
#### **4.1.1 Sistema 01 - Aquecimento elétrico de água**

O primeiro sistema elaborado é um modelo de aquecimento elétrico de água, para que seja possível realizar as comparações necessárias para alcançar os objetivos deste trabalho. Nesse sistema, todo o aquecimento de água provém da energia elétrica consumida da rede. Por meio da Figura 11, é possível compreender a estruturação do sistema (a) e o respectivo projeto elaborado no TRNSYS (b).

Figura 11 – Sistema 01: aquecimento elétrico de água



(a)



(b)

Fonte: o autor.

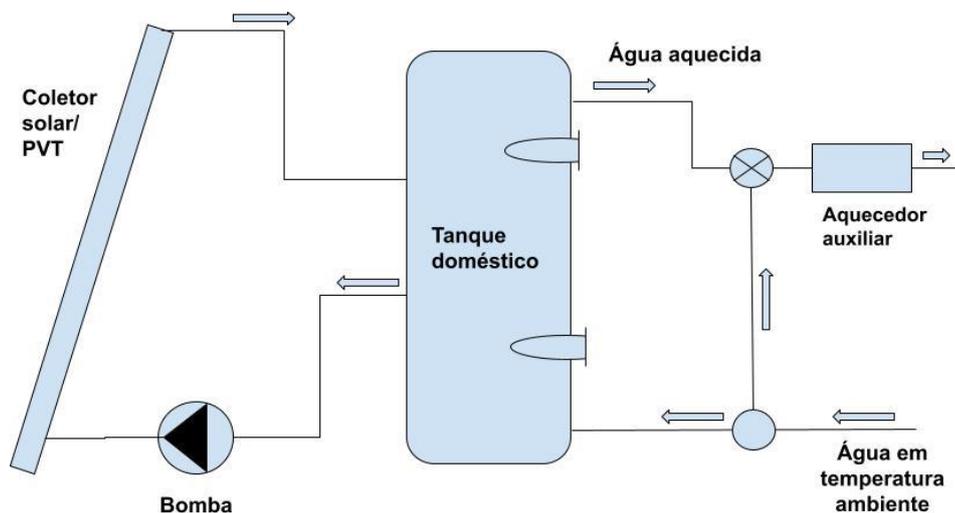
Para definir o momento em que os aquecedores fossem acionados, o componente exige que sejam especificadas as temperaturas de banda morta, que correspondem à diferença entre o ponto de ajuste e o ponto onde o interruptor é novamente acionado. Para esse sistema, os pontos de ajuste para os aquecedores superior e inferior do tanque foram definidos como 55 °C e 30 °C, respectivamente, com uma temperatura de banda morta de

5 °C. O ponto de ajuste da válvula misturadora termostática foi definido como 55 °C. No entanto, vale ressaltar que a válvula misturadora não irá atuar nesse sistema, uma vez que a temperatura no topo não irá ultrapassar o ponto de ajuste.

#### 4.1.2 Sistemas 02 e 03 - Aquecimento solar de água

Para os sistemas de aquecimento solar de água, foi adicionado um loop solar à configuração do sistema 01, conforme observa-se na Figura 12.

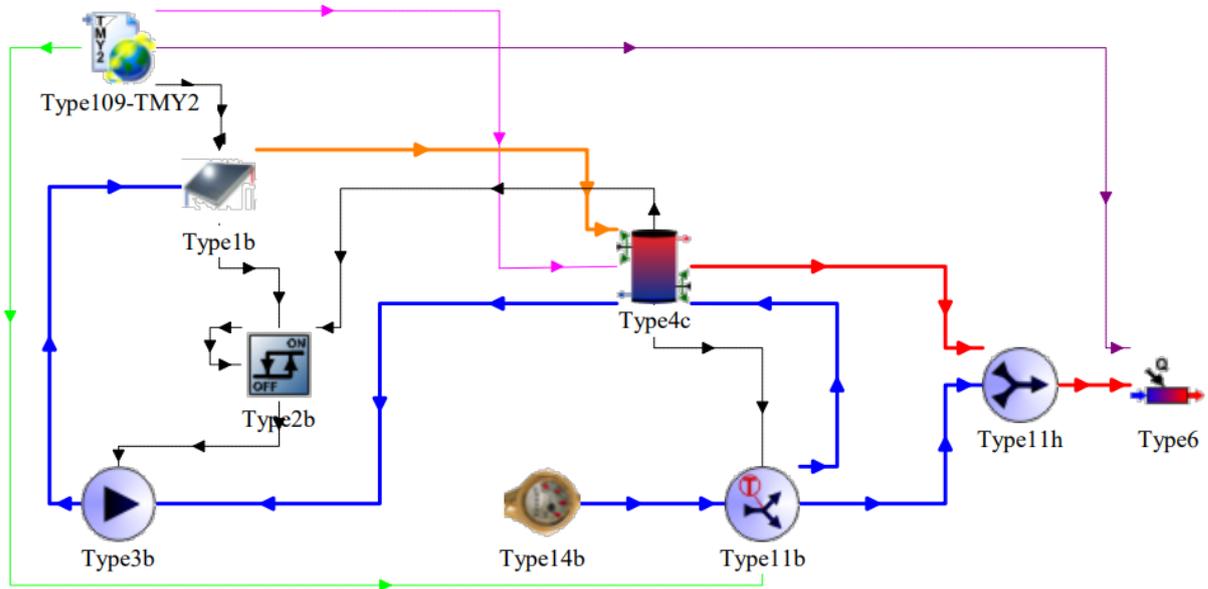
Figura 12 - Esquema básico do sistema solar de aquecimento de água



Fonte: o autor.

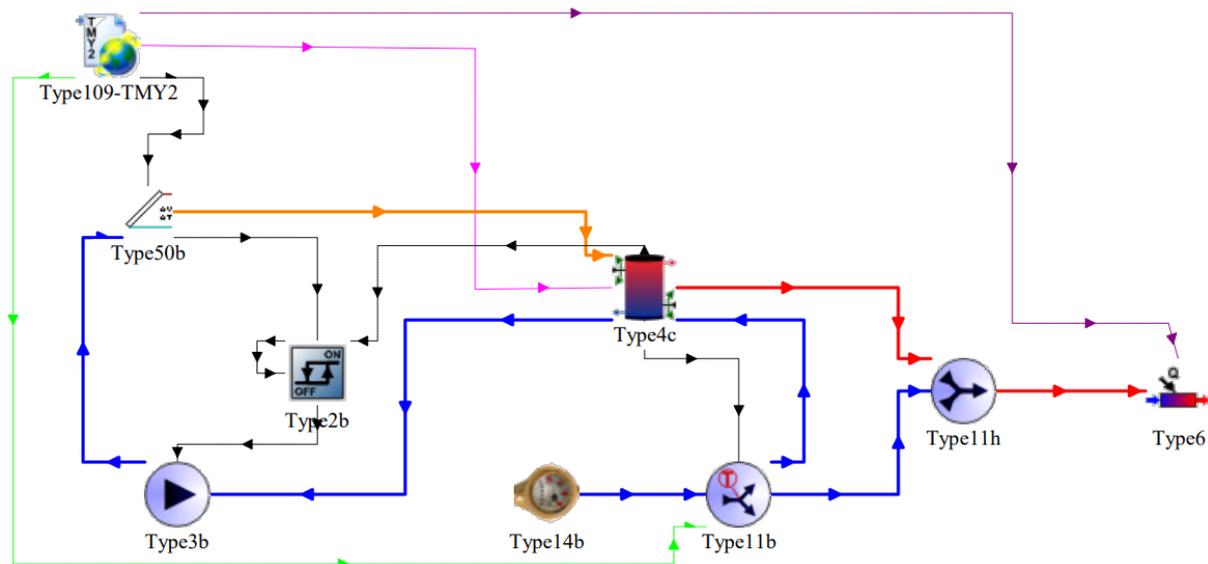
Para tanto, foi necessário acrescentar uma bomba de circulação de água (*Type3b*), um leitor de dados e processador de radiação (*Type109-TMY2*), um controlador (*Type2b*), um coletor solar (*Type1b*) para o Sistema 02 e um módulo PVT (*Type50d*) para o Sistema 03, representados nas Figuras 13 e 14, respectivamente. Vale ressaltar que a única diferença entre os dois sistemas está na utilização do coletor térmico ou na utilização do módulo PVT.

Figura 13 - Sistema 02: SAS



Fonte: o autor.

Figura 14 - Sistema 03: PVT



Fonte: o autor.

Com esses sistemas, é possível aquecer a água no tanque utilizando a energia térmica captada da radiação solar, realizada por meio do coletor solar, e, no caso do módulo PVT, a

geração de energia elétrica por intermédio das células fotovoltaicas. Dessa forma, a utilização dos aquecedores auxiliares acontecerá de forma reduzida.

Os parâmetros escolhidos para o coletor solar foram baseados nos estudos de Sterling e Collins (2011) e Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019), os parâmetros específicos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros do coletor solar

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Área do coletor	4	m <sup>2</sup>
Ângulo azimute	0	°
Eficiência de interceptação	0,8	-
Fluxo testado	40	kg/h.m <sup>2</sup>
Inclinação de eficiência	13,0	kJ/h.m <sup>2</sup> .K
Curvatura de eficiência	0,05	kJ/h.m <sup>2</sup> .K
Coeficiente IAM de 1ª ordem	0,2	-
Coeficiente IAM de 2º ordem	0,0	-

Fonte: Adaptado de Sterling e Collins (2011) e Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019).

Os parâmetros escolhidos para o módulo PVT foram baseados no estudo de Barbu, Darie e Siroux (2020), conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do Módulo PVT

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Eficiência elétrica da célula	16	%
Área do PVT	4	m <sup>2</sup>
Coeficiente de temperatura da célula	-0,5	%

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

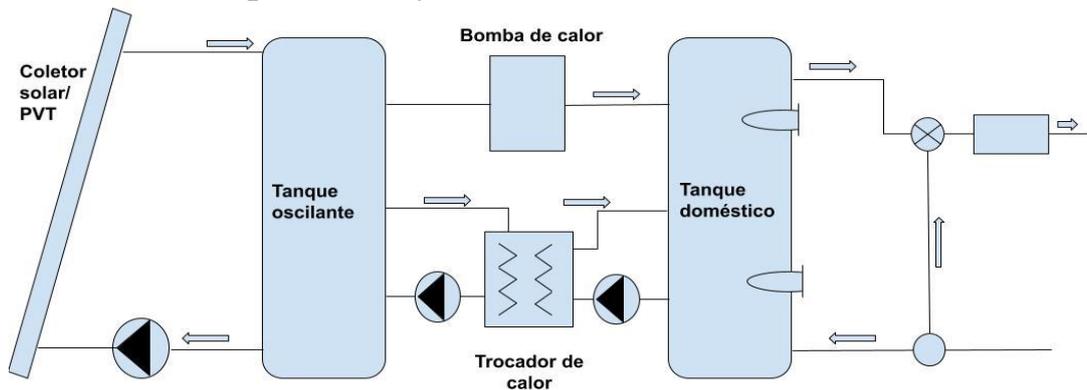
Visto que o loop solar auxiliará o aquecimento da água no tanque doméstico, as temperaturas de ponto de ajuste dos aquecedores auxiliares no topo e no fundo do tanque foram reduzidas para 50 °C e 25 °C, respectivamente. A bomba, modelada pelo *Type3b*, é responsável pela circulação de água no loop solar a uma vazão de 100 kg/h, consumindo 60 kJ/h de taxa 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 coletor solar ou módulo PVT. Se a temperatura da água de saída do coletor 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.

#### ***4.1.3 Sistemas 04 e 05 - Aquecimento solar de água assistido por bomba de calor indireta de tanque duplo***

Para os sistemas de aquecimento solar de água assistido por bomba de calor indireta de tanque duplo, um novo loop foi adicionado para controlar a utilização da bomba de calor visando contribuir para o ganho de energia térmica nos sistemas, conforme observa-se na Figura 15.

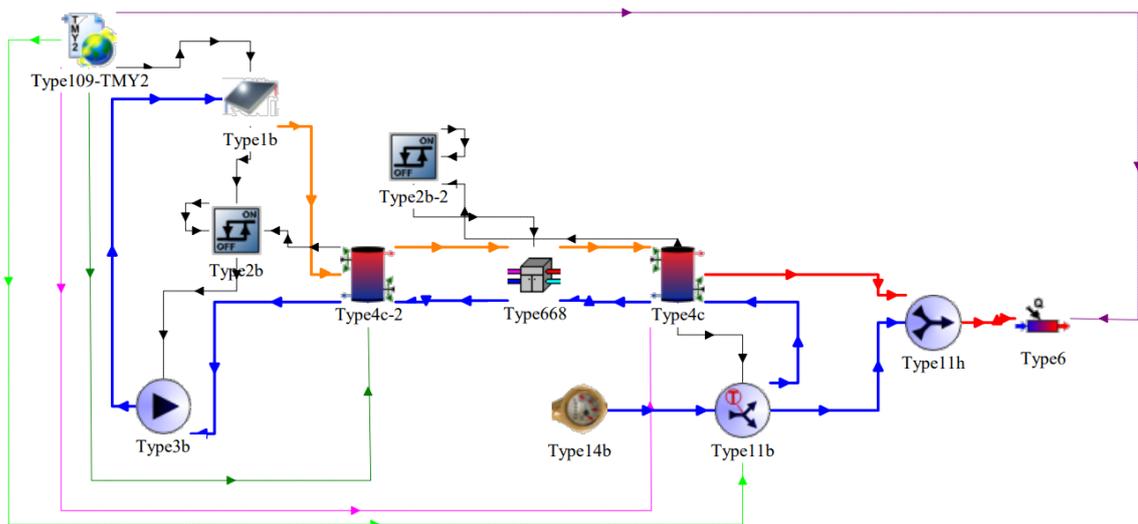
Figura 15 - Esquema básico dos sistemas 04 e 05



Fonte: o autor.

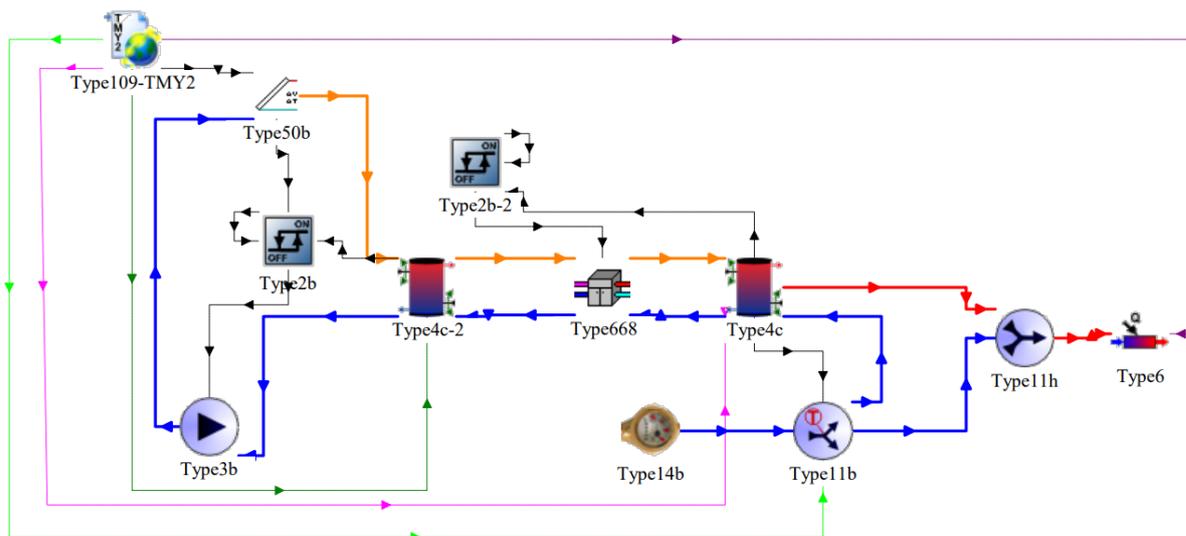
Isso posto, foi necessário acrescentar à configuração dos sistemas anteriores os seguintes componentes: bomba de calor indireta (água/água) modelada pelo *Type668*, controlador (*Type2b*) e tanque (*Type4c*), conforme apresentado nas Figuras 16 e 17. Ressalta-se que a diferença entre os dois sistemas é, apenas, a utilização do coletor solar térmico de placa plana no SAHP e a utilização do módulo PVT no sistemas PVT-HP.

Figura 16 - Sistema 04: SAHP



Fonte: o autor.

Figura 17 - Sistema 05: PVT-HP



Fonte: o autor.

O loop solar dos sistemas 04 e 05 são semelhantes aos dois sistemas anteriores, com uma diferença em relação ao tanque adicionado: o volume do tanque oscilante foi definido como 500 L, visando garantir uma adequada capacidade térmica. O novo tanque é chamado de oscilante, pois foi permitido que a temperatura em seu interior oscile constantemente. Uma diferença considerável em relação aos sistemas anteriores é que nestes sistemas é implementada a utilização de uma mistura de 50% de água e 50% de glicol no loop 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

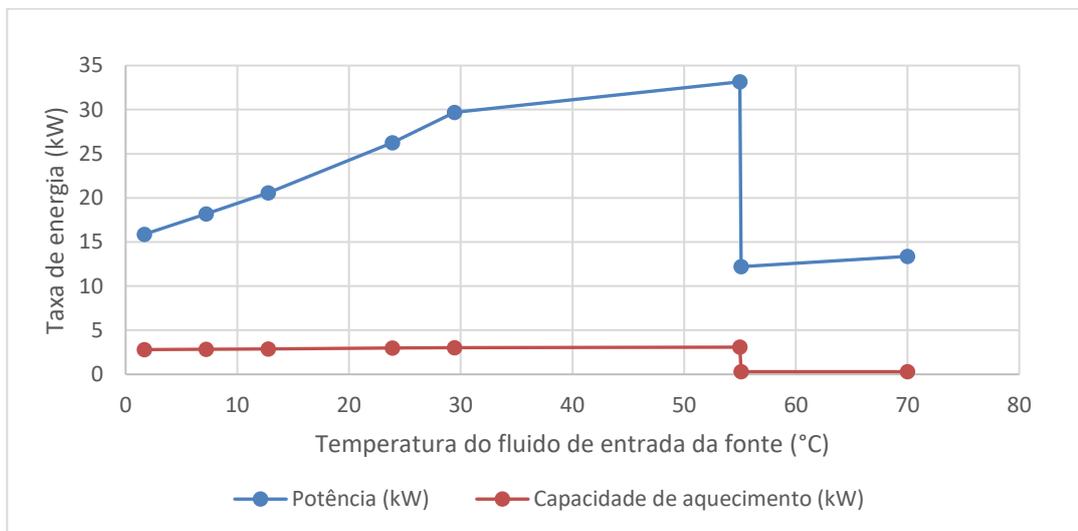
Como citado anteriormente, para que o *Type* possa realizar a modelagem da bomba de calor, é necessário que haja um arquivo externo de desempenho desse componente. Para tanto, foi escolhido o modelo de bomba de calor água e água Trane EXW 060 e elaborado o arquivo externo (Apêndice A) com base nas informações de catálogo do equipamento (TRANE, 2020). 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.

Conforme observado, para o arquivo externo da bomba de calor são combinadas as temperaturas de entrada da carga para cada temperatura de entrada da fonte, caso a

temperatura seja diferente das especificadas no arquivo, o *software* realiza interpolação linear para definir a potência e a capacidade de aquecimento.

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 15 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 necessário 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. É possível entender como acontece esse funcionamento por meio da Figura 18. Quando a temperatura de entrada da fonte atinge 55,1 °C apenas a bomba era necessária para realizar a troca de calor, enquanto a bomba de calor exigiria uma quantidade maior de potência para operar o compressor.

Figura 18 - Modelo da bomba de calor para temperatura de entrada da carga de 10°C



Fonte: o autor.

Foi inserido mais um controlador (*Type2b*) para os Sistemas 04 e 05 visando controlar o funcionamento da bomba de calor, enquanto o controlador para o loop solar se manteve com a mesma configuração e parâmetros. Para o loop 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.

Por fim, 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. Já os aquecedores auxiliares presentes no tanque doméstico tiveram seus pontos de ajuste reduzidos para 45 °C e 15 °C, ambos usando uma banda morta de 5 °C.

#### 4.2 Balanço de energia

O balanço de energia do Sistema 01 pode ser calculado pela Eq. (13).

$$\dot{Q}_{dtanque,Aux} + \dot{Q}_{Aux} = \dot{E}_{carga,entrada} + \dot{Q}_{dtanque,perda} \quad (13)$$

Sendo:

$\dot{E}_{carga,entrada}$	[kJ/h]	Taxa total de energia requerida
$\dot{Q}_{dtanque,Aux}$	[kJ/h]	Taxa de energia consumida pelos aquecedores auxiliares do tanque doméstico
$\dot{Q}_{Aux}$	[kJ/h]	Taxa de energia consumida pelo aquecedor auxiliar
$\dot{Q}_{dtanque,perda}$	[kJ/h]	Perda de calor no tanque doméstico

O balanço de energia para o sistema 02 pode ser calculado pela Eq. (11).

O balanço de energia para o sistema 03 pode ser calculado pela Eq. (14).

$$\dot{Q}_{dtanque,Aux} + \dot{Q}_{Aux} + Q_u + \dot{Q}_e + \dot{W}_{bomba} = \dot{E}_{carga,entrada} + \dot{Q}_e + \dot{Q}_{dtanque,perda} \quad (14)$$

Sendo:

$\dot{Q}_e$  [kJ/h] Taxa de energia solar obtida

O balanço de energia para o sistema 04 pode ser calculado pela Eq. (12).

O balanço de energia para o sistema 05 pode ser calculado pela Eq. (15).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{dtanque,Aux} + \dot{Q}_{ftanque,Aux} + \dot{Q}_{Aux} + Q_u + \dot{Q}_e + \dot{W}_{bomba} + \dot{W}_{HP} \\ = \dot{E}_{carga,entrada} + \dot{Q}_e + \dot{Q}_{dtanque,perda} + \dot{Q}_{ftanque,perda} \end{aligned} \quad (15)$$

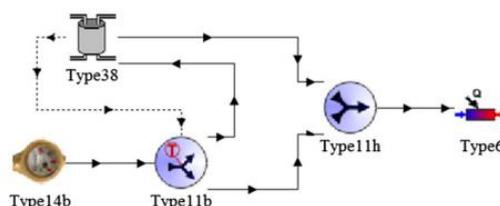
### 4.3 Validação dos projetos simulados

Para realizar a validação dos sistemas simulados, foram pesquisados artigos que apresentassem configurações semelhantes e utilizassem o mesmo *software* e versão empregados neste estudo. Vale ressaltar que optou-se por comparar com as bibliografias apenas o Sistema 01, 02 e 04, visto que os Sistemas 03 e 05 possuem a mesma configuração dos sistemas 02 e 04, e para o *Type* do PVT apenas há uma suplementação ao módulo do coletor solar, conforme explicado anteriormente. Além disso, não foram encontradas pesquisas com o módulo PVT que realizassem uma simulação semelhante e na versão do *software* utilizado neste estudo.

Uma diferença relevante deste estudo para as pesquisas que serão utilizadas para validação é a temperatura da água de entrada no sistema. Sterling e Collins (2011) definiram que essa temperatura seria constante e teria o valor de 10 °C, Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019) também definiram como constante, entretanto, com valor de 15 °C. Além disso, os parâmetros “temperatura ambiente” nos *types* dos tanques e do aquecedor auxiliar também estão constantes, como 20 °C nas pesquisas. Dessa forma, para as validações, esses parâmetros foram modificados nos projetos elaborados neste estudo, objetivando se igualarem aos das pesquisas de referência, tornando possível a comparação entre os resultados.

Visando validar o Sistema 01, utilizou-se a pesquisa elaborada por Sterling e Collins (2011), que também modelava um sistema elétrico de aquecimento de água doméstica, conforme Figura 19.

Figura 19 - Configuração do sistema de Sterling e Collins (2011)



Fonte: Sterling e Collins (2011).

Foi realizada a comparação dos valores obtidos pela simulação, de acordo com os valores elencados no artigo de referência, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação de resultados de consumo ou ganho de energia para o Sistema 01

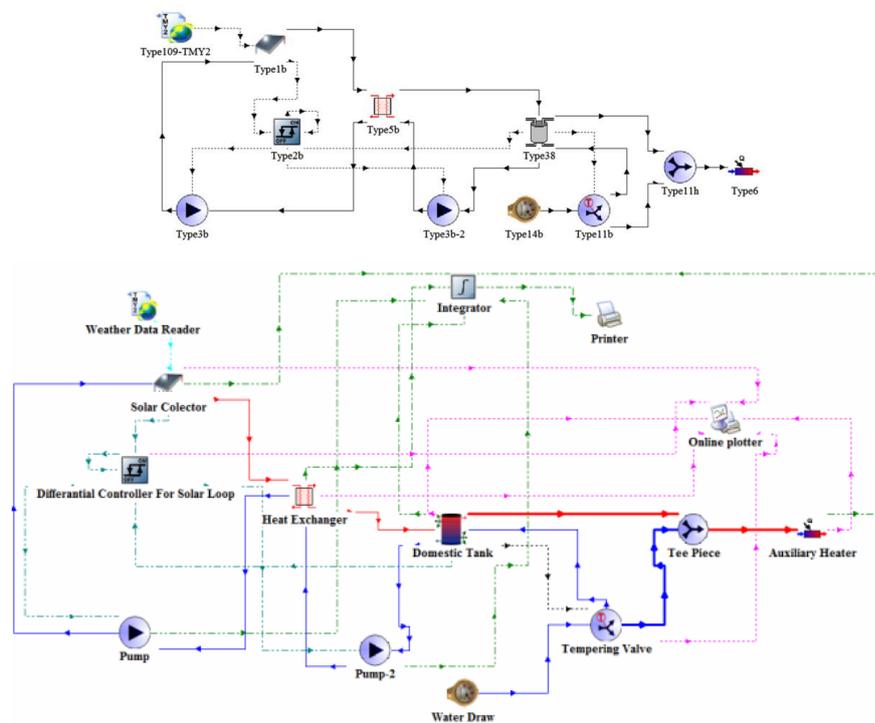
Componente	Valor de consumo ou perda de energia anual (MJ)	
	Pesquisa de referência	Este estudo
Aquecedores auxiliares (tanque)	18.002	18.100
Aquecedor auxiliar	2.068	2.090
Consumo total elétrico	20.070	20.200
Perdas térmicas do tanque	621	752

Fonte: o autor.

Para a validação dos Sistemas 02 e 03, foram utilizadas as pesquisas de Sterling e Collins (2011) e Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019), conforme observa-se na Figura 20. Uma diferença considerável em relação a esta pesquisa para as de referência é que no loop solar utiliza-se uma mistura de 50% de água e 50% de glicol, medida que se justifica para evitar a condensação do fluido nos dias mais frios. Dessa forma, para realizar a comparação, foi

necessário implementar o trocador de calor e modificar o valor do calor específico do fluido no loop solar para 3,29 kJ/kg.K. Também se fez necessário alterar o parâmetro de desligamento da bomba do loop solar, que ficará acionada até que a diferença de temperatura no fundo do tanque doméstico e do coletor solar seja de 2 °C. Além disso, também foi necessário alterar o arquivo climático do *Type109* para as cidades analisadas pelos artigos de referência.

Figura 20 - Modelos TRNSYS das pesquisas de referência para os Sistemas 02 e 03



Fonte: Sterling e Collins (2011) e Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019).

Foi realizada a comparação dos valores obtidos pela simulação, de acordo com os valores elencados nos artigos de referência, conforme Tabela 4. Foram realizadas duas simulações com o sistema 02 elaborado neste trabalho, visto que as cidades analisadas são diferentes entre os artigos de Sterling e Collins (2011) e Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019), que utilizam os dados climáticos referentes às cidades de Saravejo e Ottawa, respectivamente.

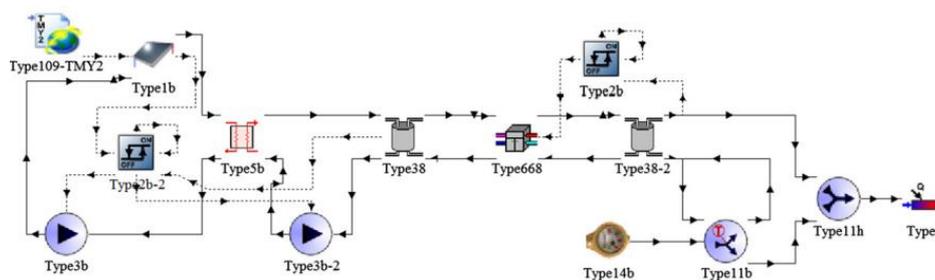
Tabela 4 - Comparativo entre as pesquisas de referência e o Sistema 02

Componente	Valor de ganho, perda ou consumo de energia anual (MJ)			
	Sterling e Collins	Este estudo (Ottawa)	Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal	Este estudo (Saravejo)
Aquecedores auxiliares (tanque)	6.696	5.280	11.138	12.900
Aquecedor auxiliar	1.838	1.360	1.212	2.090
Bombas	181	352	320	334
Consumo total elétrico	8.714	6.992	12.670	15.324
Perdas térmicas do tanque	1.186	1.600	1.347	1.260
Energia solar coletada	12.077	11.500	10.964	10.900

Fonte: o autor.

Para a validação dos Sistema 04 e 05, foi utilizado a pesquisa de Sterling e Collins (2011) como referência de comparação, conforme Figura 21. Assim como na validação anterior, foi necessário alterar o parâmetro de desligamento da bomba do loop solar, que ficará acionada até que a diferença de temperatura no fundo do tanque doméstico e do coletor solar seja de 2 °C, e o arquivo climático.

Figura 21 - Modelo TRNSYS de Sterling e Collins (2011)



Fonte: Sterling e Collins (2011).

Foi realizada a comparação dos valores obtidos pela simulação, de acordo com os valores elencados no artigo de referência, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Comparativo entre a pesquisa de referência e o Sistema 04

Componente	Valor de ganho, perda ou consumo de energia anual (MJ)	
	Sterling e Collins	Este estudo
Aquecedores auxiliares (tanques)	241	216
Aquecedor auxiliar	912	998
Bombas	210	268
Bomba de calor	6.024	5.300
Consumo total elétrico	7.387	6.784
Perdas térmicas do tanque	1.687	1.340
Energia solar coletada	14.805	15.500

Fonte: o autor.

Diante do exposto, observa-se que os valores simulados para os sistemas elaborados neste estudo se aproximam às outras pesquisas realizadas no campo do aquecimento solar com utilização de bomba de calor para água de uso doméstico, validando assim, a utilização de seus resultados para a análise a fim de alcançar os objetivos desta pesquisa. Vale ressaltar que os resultados não foram idênticos, pois as pesquisas utilizadas como referência não disponibilizam todas as informações necessárias para uma perfeita replicação do projeto.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são descritos os resultados obtidos por meio das simulações para os cinco sistemas propostos, aplicados às quatro cidades de referência. Primeiramente, é apresentada a comparação dos resultados anuais entre os projetos, no que diz respeito ao consumo elétrico dos componentes do sistema, o aproveitamento térmico e a geração de energia elétrica. Em seguida, é analisado pormenorizadamente o 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. Por fim, os resultados de novas simulações são apresentados visando avaliar a influência da variação de parâmetros específicos, com o objetivo de otimizar o projeto.

### 5.1. Comparação entre os sistemas

Foi realizada a comparação anual entre os sistemas convencionais em relação ao sistema PVT-HP, para os municípios de Belo Horizonte/MG, Brasília/DF, Florianópolis/SC e Recife/PE. Foram levantados os dados referentes ao consumo elétrico pelos aquecedores presentes nos tanques de armazenamento de água, aquecedor auxiliar, bomba e bomba de calor, assim como as perdas térmicas ocorridas nos tanques, e por fim, os ganhos térmicos e elétricos gerados pelos sistemas.

Nas Tabelas 06, 07, 08 e 09 são apresentados os valores totais de consumo elétrico de cada componente ao longo de um ano, bem como as perdas térmicas ocorridas nos tanques de armazenamento de água, para as cidades estudadas. Observa-se que, em todas as situações, o consumo foi menor que no sistema totalmente elétrico, uma vez que foram utilizadas a energia solar e/ou a bomba de calor nas outras configurações. Foram obtidos valores semelhantes de consumo elétrico para os sistemas SAS e PVT para as quatro situações. Os sistemas SAHP e PVT-HP apresentaram uma redução considerável de consumo em relação aos dois sistemas anteriores, apresentando uma diminuição média de aproximadamente 70% para todos os casos.

Tabela 6 – Valores anuais para Belo Horizonte

Parâmetro	Valores anuais (MJ/ano)				
	Elétrico	SAS	PVT	SAHP	PVT-HP
Aquecedores (tanque doméstico)	14405	9547	9462	0	0
Aquecedores (tanque oscilante)	-	-	-	0	0
Aquecedor Auxiliar	2079	2089	2098	971	974
Bomba	-	200	213	298	323
Bomba de calor	-	-	-	2620	2817
Consumo total elétrico	16124	11836	11773	3889	4114
Perdas térmicas tanques	837	1291	1274	3213	2947

Fonte: o autor

Tabela 7 – Valores anuais para Brasília

Parâmetro	Valores anuais (MJ/ano)				
	Elétrico	SAS	PVT	SAHP	PVT-HP
Aquecedores (tanque doméstico)	14115	8791	8744	0	0
Aquecedores (tanque oscilante)	-	-	-	0	0
Aquecedor Auxiliar	2077	1891	1905	987	981
Bomba	-	206	219	262	281
Bomba de calor	-	-	-	2205	2392
Consumo total elétrico	16192	10889	10867	3454	3654
Perdas térmicas tanques	822	1367	1367	3768	3537

Fonte: o autor

Tabela 8 – Valores anuais para Florianópolis

Parâmetro	Valores anuais (MJ/ano)				
	Elétrico	SAS	PVT	SAHP	PVT-HP
Aquecedores (tanque doméstico)	14233	10302	10212	0	0
Aquecedores (tanque oscilante)	-	-	-	0	0
Aquecedor Auxiliar	2084	2129	2136	977	981
Bomba	-	196	210	318	354
Bomba de calor	-	-	-	2874	3146
Consumo total elétrico	16317	12628	12558	4169	4480
Perdas térmicas tanques	889	1274	1274	3060	2758

Fonte: o autor

Tabela 9 – Valores anuais para Recife

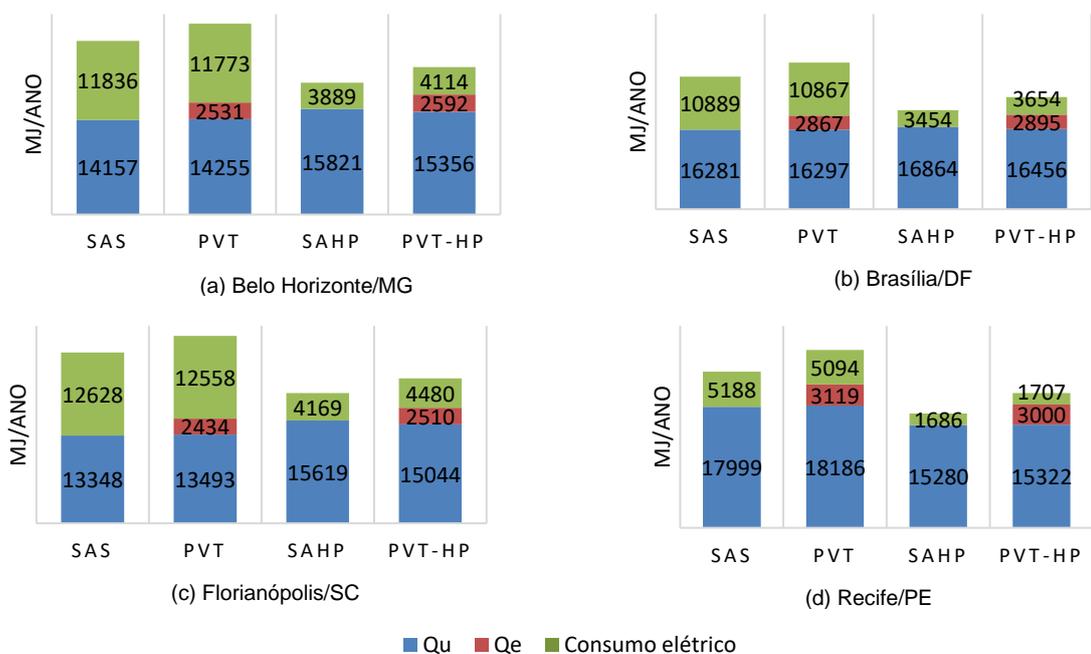
Parâmetro	Valores anuais (MJ/ano)				
	Elétrico	SAS	PVT	SAHP	PVT-HP
Aquecedores (tanque doméstico)	9828	3737	3646	0	0
Aquecedores (tanque oscilante)	-	-	-	0	0
Aquecedor Auxiliar	2048	1242	1225	911	911
Bomba	-	209	223	203	218
Bomba de calor	-	-	-	573	578
Consumo total elétrico	11876	5188	5094	1686	1707
Perdas térmicas tanques	397	1428	1428	4203	4224

Fonte: o autor

A utilização da bomba de calor resultou em um valor considerável de redução de consumo para os sistemas, acarretando a supressão do consumo por parte dos aquecedores presentes nos tanques e uma diminuição relevante na utilização do aquecedor auxiliar. Constata-se que, considerando apenas o consumo de energia elétrica, os sistemas apenas térmicos, ou seja, SAS e SAHP, apresentam valores menores de consumo em relação aos sistemas que possuem o módulo PVT, uma vez que a cobertura da superfície do coletor térmico pela placa PV diminui a eficiência térmica do módulo.

Considerando todas as situações, o consumo de energia elétrica da rede se fez menor nas simulações do SAHP. Entretanto, esse sistema não fornece energia elétrica, uma vez que não possui células fotovoltaicas. O sistema PVT-HP tem um consumo de 2% a 7%, aproximadamente, maior do que o SAHP, de acordo com a cidade. Em contrapartida, o painel PV tem capacidade de disponibilizar grande parte da energia elétrica consumida pelo sistema, conforme observa-se na Figura 22, em que  $Q_u$  representa a taxa de energia térmica obtida pelo coletor solar e  $Q_e$  a taxa de energia elétrica obtida pelo painel PV. Vale ressaltar que, para a cidade de Recife/PE, o painel gera um valor de energia superior ao necessário pelo sistema.

Figura 22 – Taxas de energia anual dos sistemas



Fonte: o autor.

Para a análise da eficiência dos coletores solares, foi elaborada a Tabela 10, em que são apresentadas as eficiências térmica e/ou elétrica para cada sistema, levando em consideração o aproveitamento anual de energia. O SAHP apresentou maior eficiência térmica se comparado ao SAS, assim como o PVT-HP, que também obteve maior eficiência térmica e elétrica se comparada ao PVT. Nota-se, portanto, que a utilização da bomba de calor favorece a eficiência térmica e elétrica. Isso ocorre, pois esse componente atua retirando calor do fluido que circula no circuito solar, dessa forma, há maior aproveitamento térmico e maior resfriamento do módulo fotovoltaico, fator favorável para a eficiência elétrica (FRAISSE *et al*, 2007; ZHANG *et al.*, 2022). Entretanto, nota-se uma tendência contrária nas simulações realizadas em Recife/PE visto que as eficiências foram maiores no sistema PVT. Isso ocorreu devido aos maiores níveis de radiação solar incidente na cidade, que resultou em uma utilização consideravelmente menor da bomba de calor, conforme será apresentado adiante. Dessa forma, os benefícios de resfriamento não foram evidenciados. Além disso, o PVT-HP possui um tanque de capacidade térmica maior. Dessa forma, nesse sistema o fluido foi mantido em temperatura mais elevada ao longo do dia, diminuindo a eficiência elétrica do coletor.

Tabela 10 – Eficiências dos coletores solares dos sistemas

Cidade	SAS		PVT		SAHP		PVT-HP	
	$\eta_T$ (%)	$\eta_T$ (%)	$\eta_e$ (%)	$\eta_T$ (%)	$\eta_T$ (%)	$\eta_T$ (%)	$\eta_e$ (%)	
Belo Horizonte	59,99	60,40	10,72	67,04	65,06	10,98		
Brasília	60,47	60,53	10,65	61,12	61,11	10,75		
Florianópolis	58,91	59,55	10,74	68,93	66,38	11,07		
Recife	59,81	60,43	10,36	50,77	50,91	9,97		

Fonte: o autor.

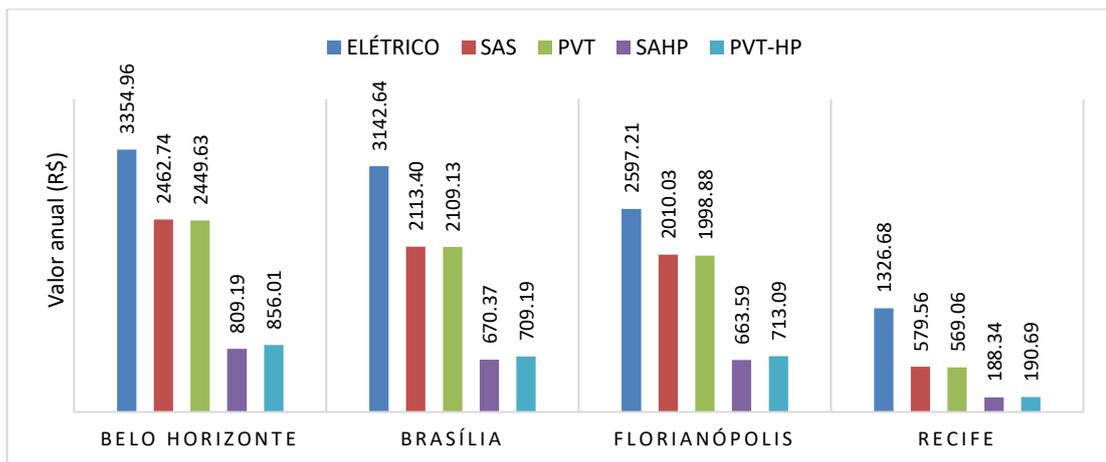
Diante do exposto, constatou-se que os sistemas integrados a bomba de calor apresentam os melhores resultados, consoante às pesquisas de Sterling e Collins (2011) e Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019). O coletor solar integrado ao módulo PV, integrante do sistema PVT-HP, ofereceu menor aproveitamento térmico da energia solar comparado ao sistema SAHP, visto que a cobertura criada pelo painel reduz a eficiência térmica (CHOW, HE e JI, 2006).

### 5.1.1. Custo operacional dos sistemas

O custo operacional dos sistemas está diretamente relacionado ao consumo elétrico da rede. Para calcular o custo, foram levantados o valor das tarifas de consumo, em R\$/kW.h para as quatro cidades analisadas, sendo 0,74906 para Belo Horizonte (CEMIG, 2023), 0,69871 para Brasília (NEOENERGIABRASILIA, 2023), 0,57302 para Florianópolis (CELESC, 2023) e 0,40216 para Recife (NEOENERGIAPERAMBUCO, 2023).

Conforme Figura 23, observa-se que a utilização dos sistemas que utilizam a bomba de calor em relação ao sistema totalmente elétrico tem uma significativa redução do valor de tarifa para as cidades de Belo Horizonte e Brasília, ocasionando uma redução anual de aproximadamente R\$ 2.500,00, para Florianópolis a redução foi de cerca de R\$1.900,00 e em Recife a redução foi menos significativa, por volta de R\$1.100,00. Entretanto, proporcionalmente, Recife/PE apresentou a maior redução, sendo de aproximadamente 85%. Em Belo Horizonte/MG e Brasília/DF, essa redução correspondeu a aproximadamente 74% e 72% em Florianópolis/SC.

Figura 23 – Valores anuais de tarifa de consumo elétrico dos sistemas



Fonte: o autor.

Os valores correspondem às tarifas estipuladas para residência normal. A tarifa foi definida como bandeira verde, que corresponde ao melhor cenário de energia no país. O

cálculo realizado corresponde à tarifação da energia, para o cálculo final do preço são acrescidos os impostos e taxas, que não foram incluídos nesta pesquisa.

Embora consuma mais energia elétrica da rede, em comparação ao SAHP, o sistema PVT-HP oferece significativo valor de energia elétrica por meio do módulo PV, que extrapola a diferença e, assim, o torna uma opção atrativa. Isso posto, nos próximos tópicos o sistema PVT-HP será analisado pormenorizadamente.

## **5.2. Desempenho do sistema PVT-HP**

Neste subitem, são apresentados os resultados sazonais do sistema PVT-HP. Para avaliar o comportamento do projeto, os dados referentes às simulações anuais foram organizados de forma mensal e diária, a fim de compreender o comportamento dos componentes de acordo com as estações e as alterações climáticas e, dessa forma, compreender as melhores utilizações do sistema.

### **5.2.1 Desempenho térmico e elétrico mensal**

Os dados simulados para o período de um ano foram tabelados 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 11. Observa-se que o sistema demonstrou melhor aproveitamento térmico e geração de energia elétrica 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 11 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Belo Horizonte/MG

	MJ/mês											
	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Aquecedor												
Auxiliar	81	72	81	77	85	84	87	83	82	84	78	79
Bomba	30	19	31	24	28	26	23	23	24	30	30	34
Bomba de calor	237	170	223	225	255	270	262	236	220	249	226	246
Consumo total elétrico	348	261	334	326	368	380	372	342	325	363	335	359
Perdas térmicas tanques												
<i>Qu</i>	210	260	218	258	257	244	300	297	263	227	221	193
<i>Qe</i>	1114	1211	1190	1304	1328	1401	1450	1444	1344	1236	1186	1147
	183	217	195	224	222	234	250	251	231	202	198	184

Fonte: o autor.

O aproveitamento térmico e a geração de energia elétrica do sistema para a cidade de Brasília/DF apresentaram um comportamento semelhante ao de Belo Horizonte/MG. Conforme observa-se na Tabela 12, tendo em vista que 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 aproveitamento térmico e geração de energia elétrica 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 12 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Brasília/DF (continua)

	MJ/mês											
	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Aquecedor												
Auxiliar	82	73	81	82	84	82	87	85	83	82	78	83
Bomba	28	20	27	21	19	18	20	19	21	29	27	33

Tabela 12 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Brasília/DF (conclusão)

	MJ/mês											
	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bomba de calor	240	183	220	182	186	193	183	122	164	229	245	246
Consumo total elétrico	350	276	328	285	288	293	290	226	268	340	350	361
Perdas térmicas tanques	223	262	248	316	350	358	373	411	319	238	220	217
$Q_u$	1207	1222	1286	1411	1485	1547	1630	1587	1384	1281	1200	1216
$Q_e$	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 13, apontaram melhor aproveitamento térmico e geração de energia elétrica 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 13 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Florianópolis/SC (continua)

	MJ/mês											
	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Aquecedor Auxiliar	81	71	80	79	83	82	88	89	82	86	79	81
Bomba	24	23	29	27	33	32	27	27	32	41	29	29
Bomba de calor	154	162	204	222	303	318	318	311	350	356	232	216

Tabela 13 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Florianópolis/SC  
(conclusão)

	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
Perdas térmicas tanques	302	230	228	246	224	213	245	252	201	132	245	240
<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, o maior aproveitamento térmico e geração de energia elétrica do sistema ocorreram nos meses de janeiro, abril, agosto, outubro e dezembro, conforme Tabela 14, 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 14 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Recife/PE (continua)

	MJ/mês											
	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Aquecedor Auxiliar	75	70	76	68	81	75	80	80	74	73	74	85
Bomba	18	17	18	17	18	18	20	18	19	18	18	19
Bomba de calor	26	68	42	9	48	76	109	71	48	10	31	40
Consumo total elétrico	120	155	135	94	148	169	208	170	141	101	123	144
Perdas térmicas tanques	379	307	334	413	340	314	330	338	326	386	358	400
<i>Qu</i>	1332	1175	1202	1386	1258	1195	1295	1315	1190	1299	1252	1423

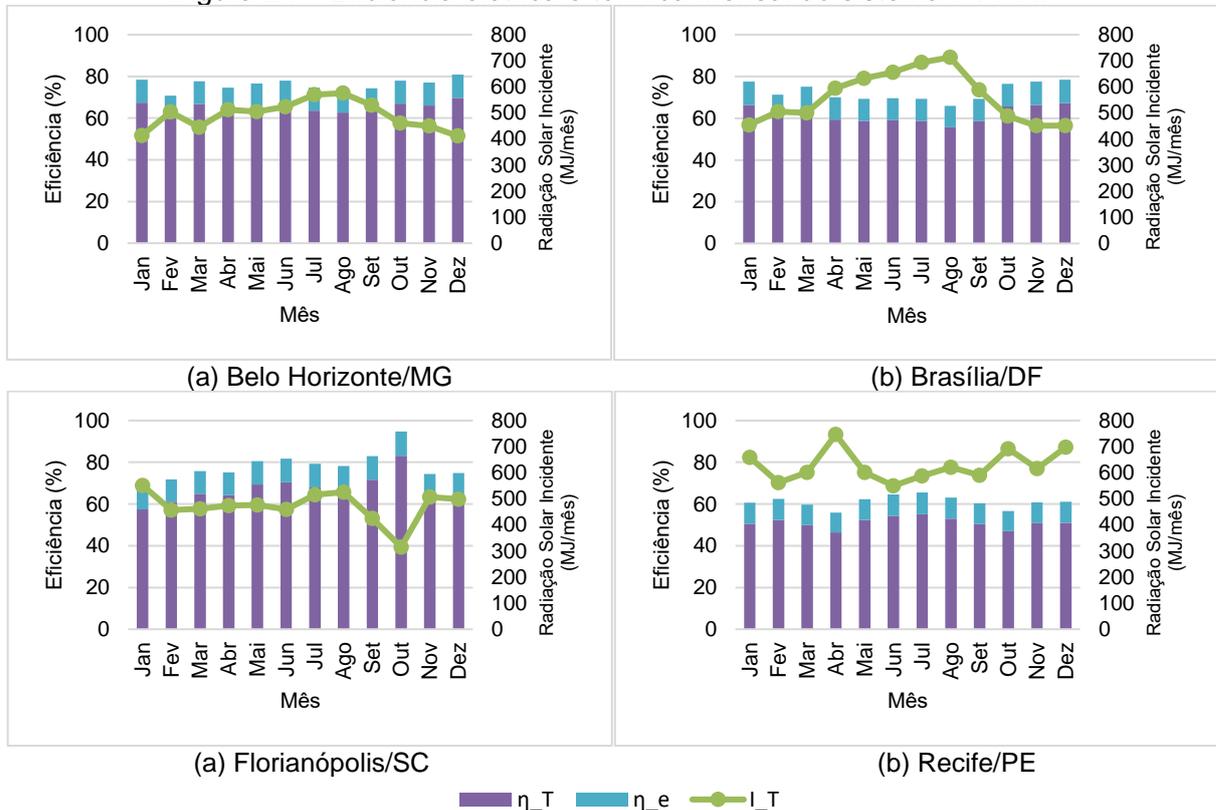
Tabela 14 – Desempenho mensal do sistema PVT-HP em Recife/PE (conclusão)

	MJ/mês											
	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<i>Q<sub>e</sub></i>	264	227	236	283	242	226	243	251	233	267	248	281

Fonte: o autor.

As eficiências térmica e elétrica para cada localidade analisada são apresentadas por meio da Figura 24, em que  $\eta_T$  corresponde à eficiência térmica,  $\eta_e$  a eficiência elétrica e  $I_T$  a radiação global incidente no coletor solar, representadas pelo valor mensal. Em Recife/PE e Florianópolis/SC, constata-se que houve maior eficiência elétrica nos meses observados com maiores níveis de aproveitamento térmico e geração de energia elétrica, conforme visto anteriormente. Em contrapartida, em Brasília/DF e Belo Horizonte/MG, as eficiências foram menores nos meses com maior aproveitamento térmico e geração de eletricidade. Os valores médios mensais de eficiência térmica e elétrica para cada cidade, respectivamente, são: 62,25 e 10,98% para Belo Horizonte/MG, 61,70 e 10,79% para Brasília/DF, 67,03 e 11,09% para Florianópolis/SC e 51,08 e 9,99% para Recife/PE.

Figura 24 – Eficiência elétrica e térmica mensal do sistema PVT-HP



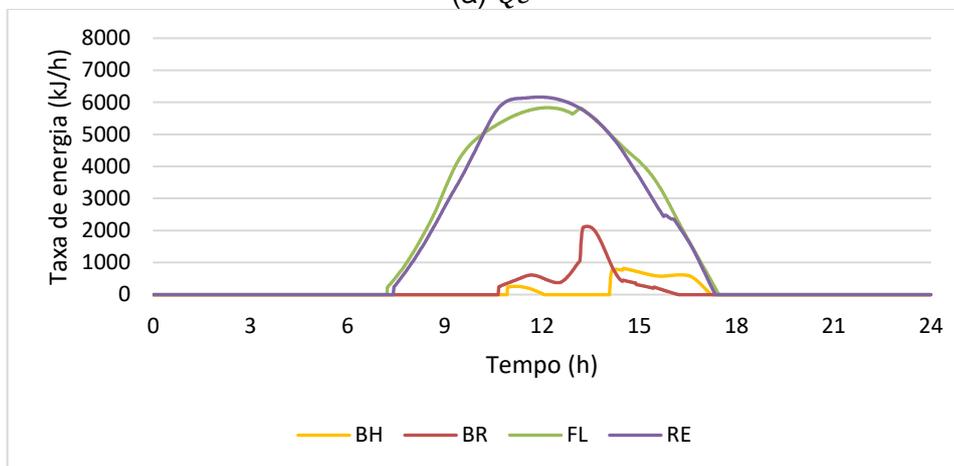
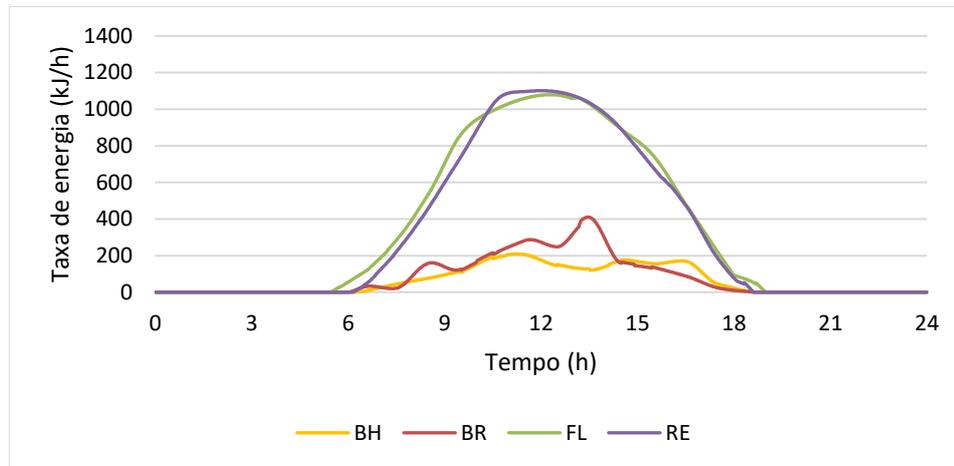
Fonte: o autor.

Com base no exposto, observa-se constância de aproveitamento térmico e geração de energia elétrica favoráveis 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 maior aproveitamento térmico e geração de energia elétrica 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.

### **5.2.2 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 25 é apresentado o resultado da simulação para as quatro cidades analisadas, sendo que (a) corresponde à  $Q_e$  e (b) ao  $Q_u$ , 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 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.

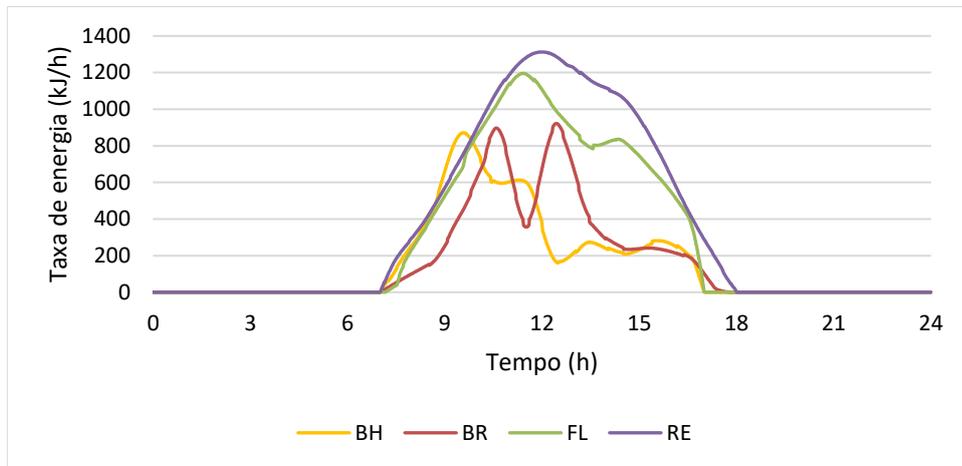
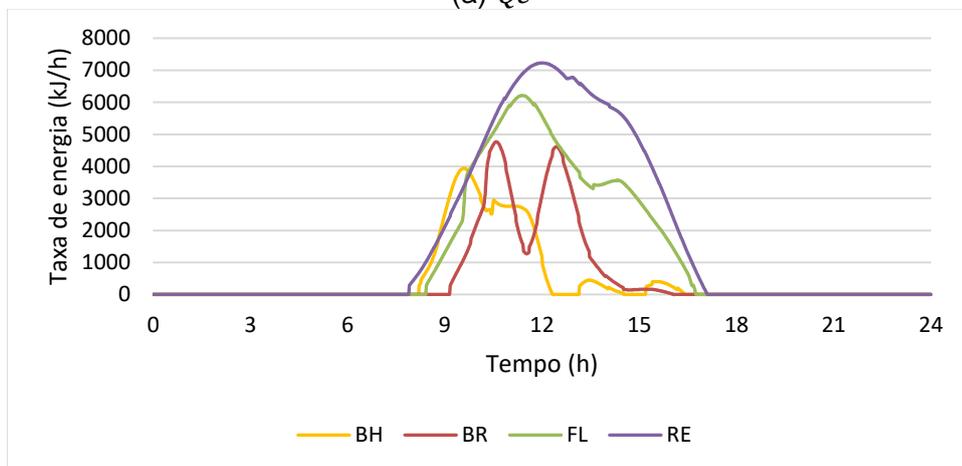
Figura 25 – Energia útil obtida pelo coletor em janeiro



Fonte: o autor.

Na Figura 26 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 26 – Energia obtida pelo painel PVT em julho

(a)  $Q_e$ (b)  $Q_u$ 

Fonte: o autor.

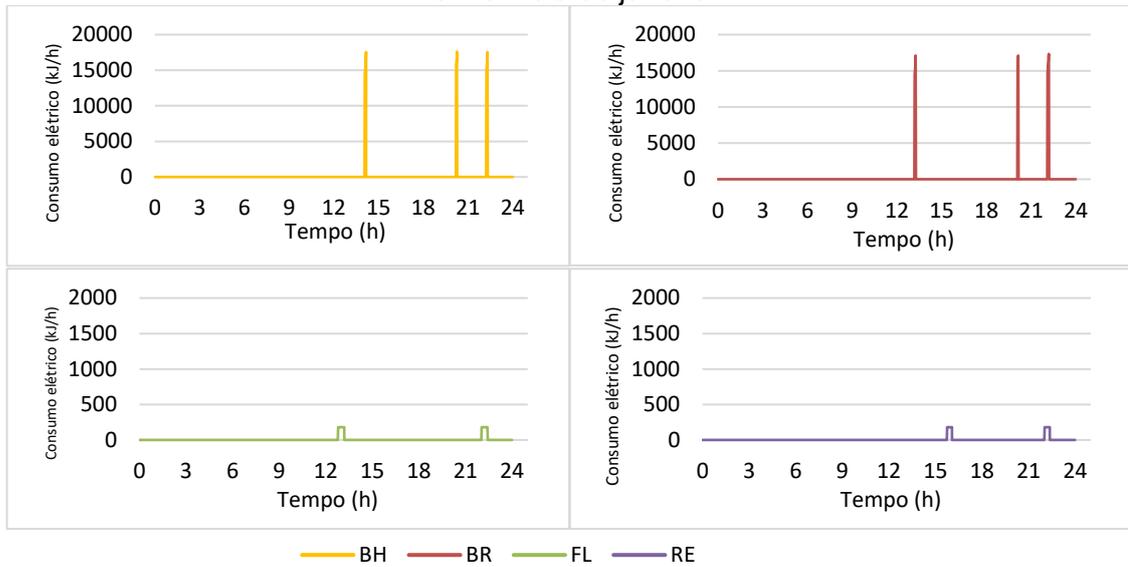
Os valores de aproveitamento térmico e geração de energia elétrica se assemelham aos gráficos apresentados na pesquisa de Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019), embora as condições climáticas sejam diferentes, nota-se o comportamento semelhante dos valores.

### 5.2.3 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 e, assim, obtidas as Figuras 27 e 28, onde é apresentado o consumo elétrico ao longo do dia. 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

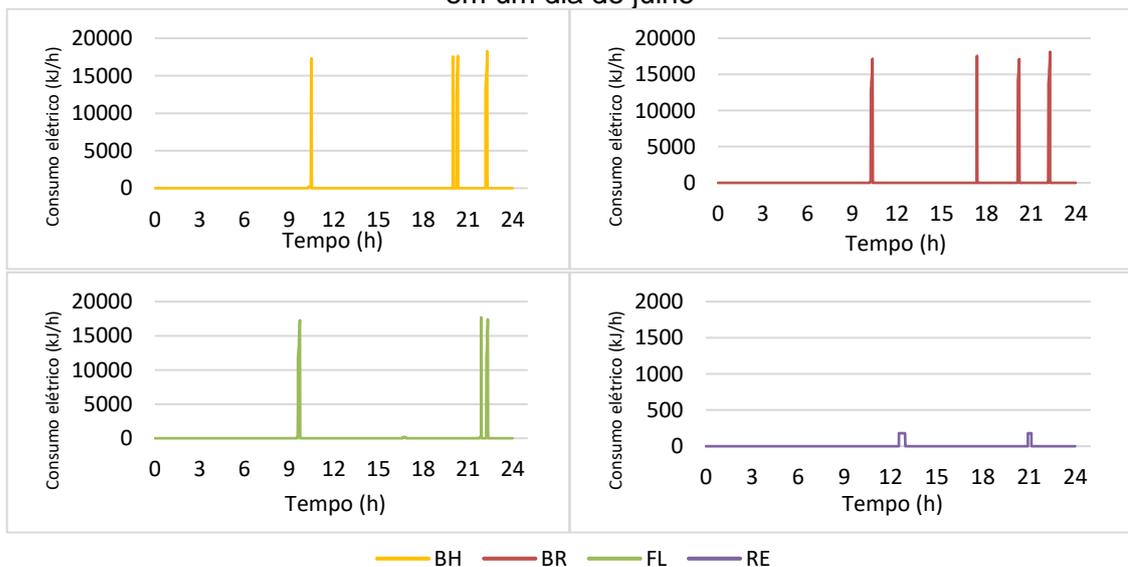
temperatura da água se mantém acima da banda morta mesmo após as duas retiradas matinais (06 h e 08 h), sendo necessário o acionamento da bomba apenas por volta de 12 e 15 h em janeiro e entre 09 e 12h em julho, em todos os casos analisados. Já nas retiradas noturnas (20 h e 22 h), houve o acionamento 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.

Figura 27 – Consumo de energia pela bomba de calor integrada ao trocador de calor em um dia de janeiro



Fonte: o autor.

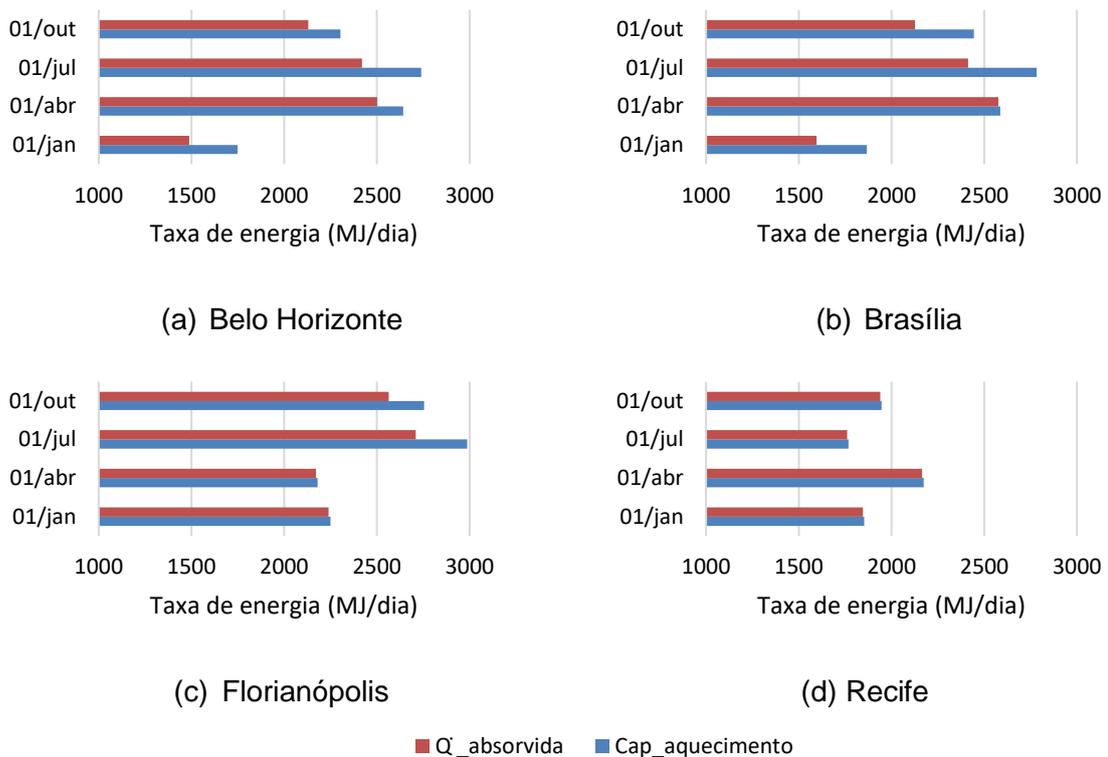
Figura 28 - Consumo de energia pela bomba de calor integrada ao trocador de calor em um dia de julho



Fonte: o autor.

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 29, em que (a) corresponde a Belo Horizonte, (b) Brasília, (c) Florianópolis e (d) Recife. Observa-se que 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 29 – Capacidade de aquecimento e energia absorvida pela bomba de calor integrada ao trocador de calor



Fonte: o autor.

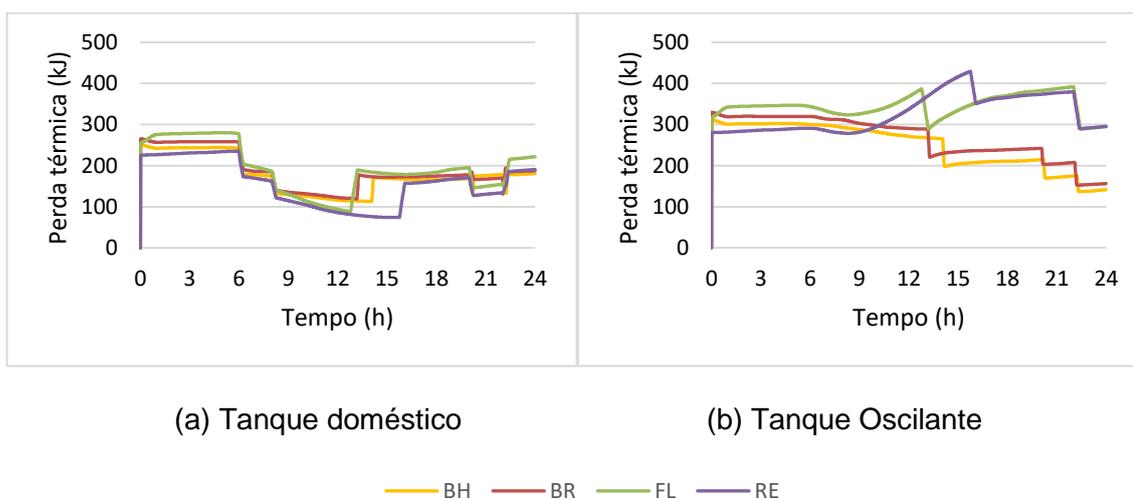
Vale ressaltar, que devido ao circuito de *by-pass* implementado para simular o trocador de calor, ficou inviável a análise isolada da bomba de calor, não sendo possível o cálculo do Coeficiente de Performance (COP).

### 5.2.4 Perdas térmicas nos tanques

Conforme demonstrado anteriormente, nas Tabelas 06, 07, 08 e 09, devido aos sistemas SAHP e PVT-HP possuírem tanque duplo, as perdas térmicas são, conseqüentemente, maiores quando comparadas às outras configurações. No entanto, analisando individualmente, o tanque doméstico, que está presente em todas as configurações, também teve uma perda maior que nos outros sistemas. Isso se deve ao fato de que, nos sistemas que foi utilizada a bomba de calor, o fluido no tanque doméstico se manteve durante todo o tempo com ponto de ajuste de temperatura de 55 °C, com uma faixa morta de temperatura estreita programada no controlador. Isso está de acordo com o observado na pesquisa de Sterling e Collins (2011).

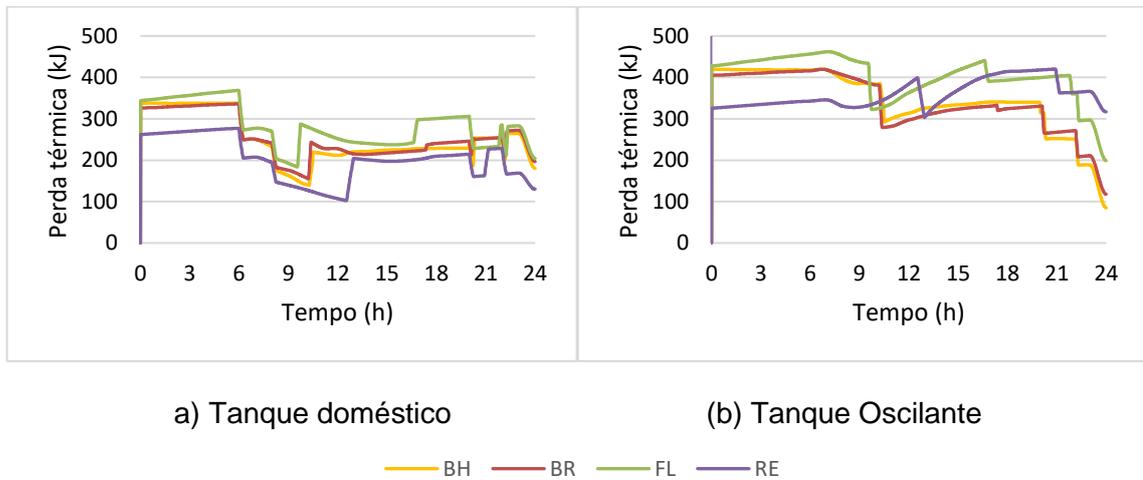
Analisando o consumo diário, por meio das Figuras 30 e 31, observa-se que as perdas térmicas ocorreram muito semelhantes no verão e no inverno. O comportamento das perdas em Brasília e Belo Horizonte apresentaram valores muito semelhantes, ficando, inclusive, sobrepostos em alguns gráficos. As perdas térmicas foram maiores nos tanques oscilantes, visto que a capacidade térmica era maior, assim como a temperatura, as quais se mantinham maiores em determinados momentos e em oscilação durante o dia.

Figura 30 – Perdas térmicas dos tanques de armazenamento em um dia de janeiro



Fonte: o autor.

Figura 31 – Perdas térmicas dos tanques de armazenamento em um dia de julho



Fonte: o autor.

### 5.3. Influência dos parâmetros do sistema PVT-HP

Nesta seção discute-se sobre os parâmetros relativos aos principais componentes utilizados no sistema PVT-HP e suas influências em relação aos resultados térmicos e elétricos. Foi definida a cidade de Belo Horizonte como referência para a realização das simulações.

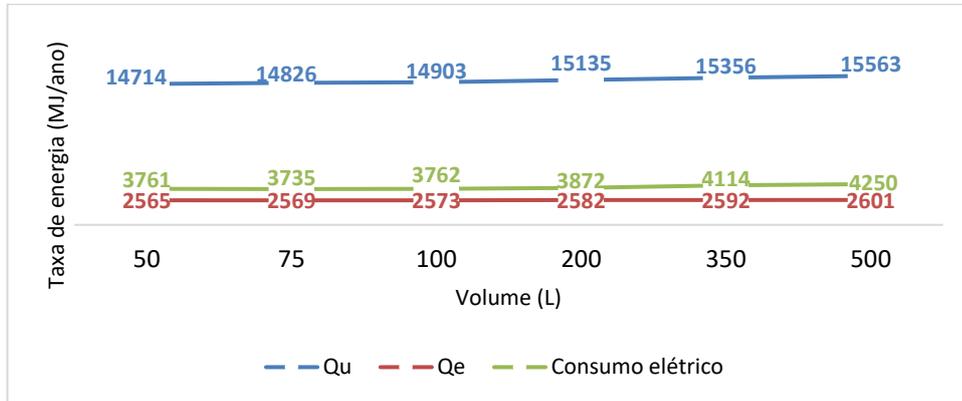
#### 5.3.1 Volume dos tanques de armazenamento

Um fator importante para o desempenho dos sistemas de aquecimento de água é o volume do tanque utilizado para armazenamento do fluido. Quanto maior o volume, maior a necessidade de energia térmica para manter a temperatura requerida pelo usuário. Para avaliar a influência desse parâmetro no consumo global anual, bem como na taxa de energia térmica e elétrica obtida, foram simulados diferentes valores de volume para o tanque doméstico e para o tanque oscilante.

Primeiramente, foram realizadas simulações com diferentes valores de volume para o tanque de armazenamento doméstico, conforme Figura 32. Com o decréscimo desse parâmetro, também ocorreu a diminuição do consumo elétrico do sistema, assim como no valor da taxa de energia térmica obtida. Entretanto, uma vez que, no sistema proposto, não há o aproveitamento dessa energia para outra finalidade, tal diminuição é irrelevante. Observa-se, porém, que o consumo elétrico tende a aumentar quando o volume do tanque é

inferior à demanda instantânea de água requerida pelo sistema. Para a vazão de água requerida de 300 kg/h, durante 15 minutos, há uma demanda total de 75 L, dessa forma, o volume do tanque doméstico como 75 L apresentou o menor consumo elétrico.

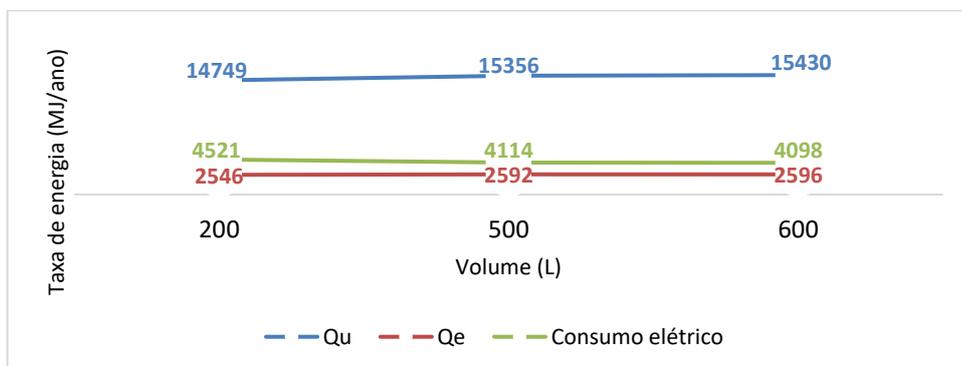
Figura 32 – Variação do volume do tanque doméstico



Fonte: o autor.

Em contrapartida, o tanque oscilante apresentou valores menores de consumo de acordo com o acréscimo de volume, conforme Figura 33. Isso corresponde a cerca de 90 MJ/Ano de redução de 200 L para 500 L e de apenas 16 MJ/Ano quando aumentado para 600 L.

Figura 33 – Variação do volume do tanque oscilante



Fonte: o autor.

Dessa forma, para dimensionar adequadamente o tanque doméstico de armazenamento é necessário considerar a demanda de água quente para concluir qual o volume adequado para o sistema, levando em consideração, também, valores maiores visando gastos eventuais. Já para o tanque oscilante, quanto maior o volume, maior a capacidade térmica, sendo assim, deve ser dimensionado observando as possibilidades de instalação.

### 5.3.2 *Temperaturas de banda morta superior e inferior nos controladores*

O termostato presente nos tanques envia o sinal da temperatura nos nós 02 e 08, de ambos os tanques, para os controladores ativarem e desativarem as bombas. No projeto inicial, foram definidos para o tanque doméstico as temperaturas de 3 e 0 °C como banda morta superior e inferior, respectivamente. Já para o tanque oscilante, foram definidas 5 e 0 °C. Foram simuladas diferentes combinações de temperaturas de banda morta para ambos os controladores.

Primeiramente, foi analisada a influência das temperaturas de banda morta para o controlador do loop solar, conforme Tabela 15. Observa-se pouca variação de consumo, de aproveitamento térmico e de geração de energia elétrica. O parâmetro 6 e 2 °C apresentou o menor consumo elétrico.

Tabela 15 – Variação das temperaturas de banda morta do controlador do loop solar  
(continua)

Temperatura de banda morta (°C)		Consumo elétrico (MJ/ano)	$Q_u$ (MJ/ano)	$Q_e$ (MJ/ano)
Superior	Inferior			
6	0	4110	15354	2592
6	2	4101	15234	2596
6	4	4137	15122	2598
5	0	4114	15356	2592

Tabela 15 – Variação das temperaturas de banda morta do controlador do loop solar (conclusão)

Temperatura de banda morta (°C)		Consumo elétrico (MJ/ano)	$Q_u$ (MJ/ano)	$Q_e$ (MJ/ano)
Superior	Inferior			
5	2	4104	15238	2596
5	4	4142	15127	2598
4	0	4118	15360	2592
4	2	4104	15243	2596
2	0	4132	15363	2592

Fonte: o autor.

Com a variação dos parâmetros para o controlador do loop da bomba de calor, percebe-se uma diferença um pouco maior que o tópico anterior, conforme Tabela 16. Nota-se que quanto menores forem os valores, menor o consumo elétrico total do sistema PVT-HP, assim como os aproveitamentos térmico e elétrico. Logo, os parâmetros superior e inferior, 1 e 0 °C, respectivamente, apresentaram os melhores resultados para a configuração proposta.

Tabela 16 – Variação das temperaturas de banda morta do controlador do loop da bomba de calor (continua)

Temperatura de banda morta (°C)		Consumo elétrico (MJ/ano)	$Q_u$ (MJ/ano)	$Q_e$ (MJ/ano)
Superior	Inferior			
6	0	4420	14946	2575
6	2	4675	14812	2569
6	4	4799	14698	2564

Tabela 16 – Variação das temperaturas de banda morta do controlador do loop da bomba de calor (conclusão)

Temperatura de banda morta (°C)		Consumo elétrico (MJ/ano)	$Q_u$ (MJ/ano)	$Q_e$ (MJ/ano)
Superior	Inferior			
3	0	4114	15356	2592
3	2	4268	15257	2588
2	0	3986	15488	2598
1	0	3894	15613	2603

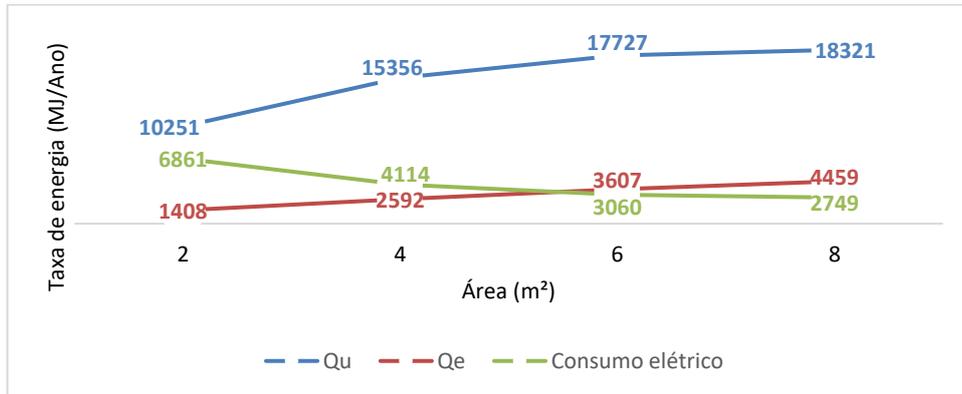
Fonte: o autor.

Analisando o estudo de Coşkun, Kandirmiş e Tunçkal (2019), foram utilizadas no loop solar as temperaturas de banda morta para o loop solar como 5 e 2 °C, tal utilização resultou no acionamento e desligamento contínuo da bomba em um curtos períodos, que poderia resultar em danos ao equipamento. A redução para 1 e 0 °C, além de contribuir para diminuir o consumo, também evita que o controlador aja da referida forma.

### 5.3.3 Área do módulo PVT

Conforme esperado, com o aumento da área do módulo PVT, há maior superfície fotovoltaica e maior área do coletor solar e, conseqüentemente, maior aproveitamento térmico e geração de energia elétrica, conforme Figura 34. Com o aumento da área para 6 m<sup>2</sup>, ou seja, 50% acima do valor original do projeto, já é suficiente para que o valor de energia elétrica gerada supere a demanda de energia elétrica do sistema.

Figura 34 – Variação da área do módulo PVT

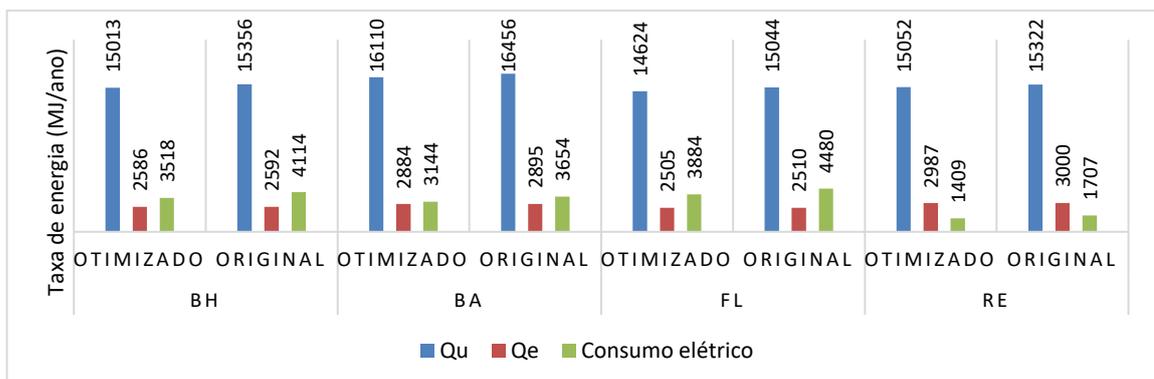


Fonte: o autor.

### 5.3.4 Otimização da configuração do PVT-HP

Em atenção aos tópicos anteriores, o projeto PVT-HP foi otimizado de acordo com os resultados mais favoráveis. Primeiramente, foi realizada a simulação do projeto alterando o volume do tanque doméstico para 100 L, e as temperaturas de banda morta do controlador do loop da bomba de calor para 1 e 0 °C, e loop solar para 6 e 2 °C. Esses parâmetros foram definidos como vantajosos tecnicamente e financeiramente, uma vez que não necessitam de gastos maiores para sua implementação, então, seus valores independem de outras análises. Conforme a Figura 35, observa-se que o consumo elétrico do projeto otimizado gerou uma diminuição de aproximadamente 12% para todas as cidades em comparação ao projeto original. A geração de energia elétrica variou menos de 1%, uma vez que não houve alteração na área do módulo PVT no projeto otimizado.

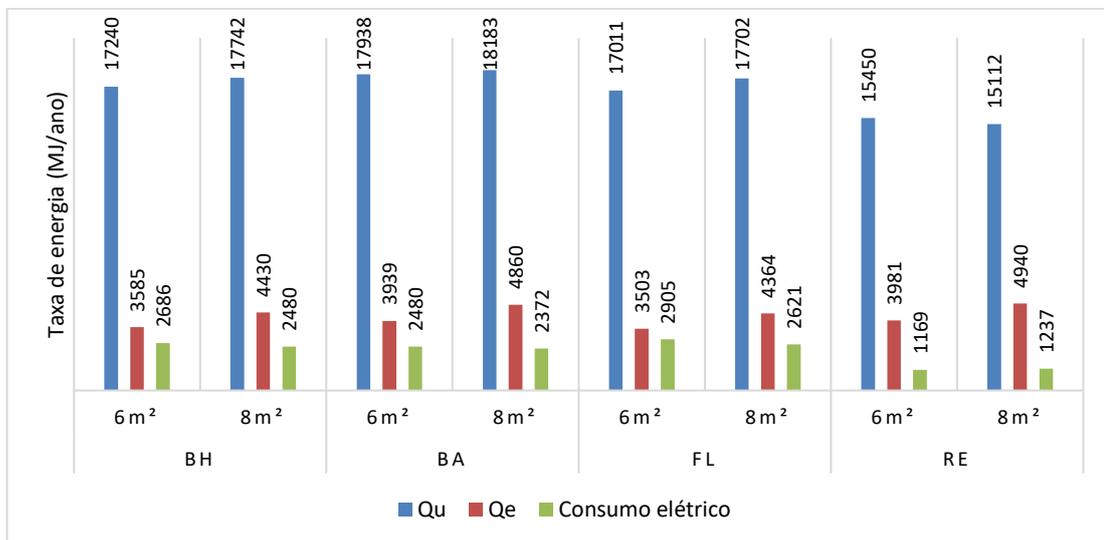
Figura 35 – Resultados do projeto otimizado



Fonte: o autor.

Tendo em vista que o aumento da área do módulo PVT, bem como do tanque oscilante, inferem em gastos adicionais, faz-se necessária a avaliação isolada para analisar a viabilidade de implementação. Visando avaliar a influência da variação da área do módulo PVT no projeto otimizado, foram realizadas simulações anuais para 6 e 8 m<sup>2</sup> de superfície do módulo, conforme Figura 36. Conforme aumenta, o módulo PVT contribui para geração de energia elétrica e aproveitamento térmico, contribuindo, assim, para a diminuição do consumo elétrico. Para todas as cidades analisadas, a área de 6 m<sup>2</sup> para o módulo gerou uma diminuição de consumo anual variando de 17 a 25% e aumento de geração de energia elétrica de 33 a 39% em relação ao projeto otimizado. O aumento da área para 8m<sup>2</sup> acarretou um aumento de cerca de 20% de geração de energia elétrica para todas as cidades. No entanto, o aumento da área do módulo ocasionou em aumento do consumo para a cidade de Recife em aproximadamente 5% em relação ao projeto com 6 m<sup>2</sup>. Nas demais cidades, esse aumento gerou uma redução de consumo de 7 a 9%.

Figura 36 – Resultados do aumento da área do módulo PVT no projeto otimizado

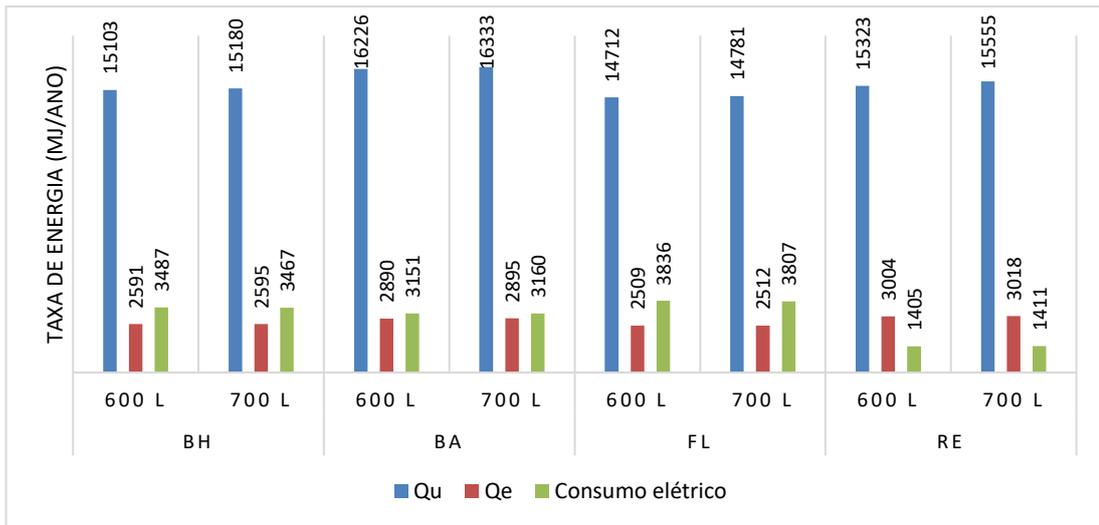


Fonte: o autor.

O aumento do volume do tanque oscilante não apresentou redução significativa no consumo elétrico. Conforme observa-se na Figura 37, o aumento para 600 L resultou em uma diminuição de consumo de aproximadamente 1% em todas as cidades. Já o aumento para

700 L resultou em uma redução de menos de 1% para Belo Horizonte e Florianópolis, em contrapartida, para Recife e Brasília, o consumo aumentou cerca de 1%.

Figura 37 – Resultados do aumento de volume do tanque oscilante no projeto otimizado



Fonte: o autor.

Diante do exposto, constata-se que o projeto otimizado apresentou redução do consumo elétrico pelo sistema. O aumento da área do módulo PVT resultou em valores favoráveis e deve ser dimensionado de acordo com as possibilidades de projeto e a demanda real da residência.

## 6 CONCLUSÃO

Conclui-se que, com a implementação do tanque oscilante e da bomba de calor, uma quantidade maior de energia térmica solar pode ser aproveitada. Isso ocorre devido às temperaturas mais baixas do fluido no tanque oscilante, ocasionadas pela utilização da bomba de calor. Sendo assim, embora a bomba presente no loop solar seja acionada com mais frequência, o aproveitamento da energia térmica útil contribui para uma redução considerável na utilização de energia elétrica da rede. Em comparação com o sistema SAHP, o sistema PVT-HP demonstrou um pequeno aumento no consumo elétrico. No entanto, a geração de energia elétrica pelo painel é um fator favorável para sua utilização. A implementação do sistema PVT-HP demonstrou maior retorno financeiro para as cidades de Belo Horizonte, Brasília e Florianópolis.

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.

Em relação aos parâmetros estabelecidos para os componentes, constatou-se que o volume para o tanque doméstico mais adequado é aquele mais próximo do valor da demanda de extração de água, enquanto o aumento do volume para o tanque oscilante apresenta uma melhoria não muito significativa no desempenho do sistema. A temperatura de banda morta mais adequada para loop solar e o da bomba de calor são 6 e 2 °C, e 1 e 0 °C, respectivamente. Observou-se que o módulo PVT possuindo uma área de 6 m<sup>2</sup> é suficiente para atender à demanda de energia elétrica, nas condições estabelecidas neste estudo, por meio da geração da placa fotovoltaica.

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. Devido à indisponibilidade dos principais componentes do projeto, a bomba de calor água/água e o módulo PVT, no comércio brasileiro, não foi possível realizar uma avaliação financeira da implementação do sistema.

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 10899**: Energia solar fotovoltaica-Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2020a.
- ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito elétrico direto: projeto e instalação**. Rio de Janeiro. 2020b.
- 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.
- ASTE, N.; LEONFORTE, F.; DEL PERO, C. Design, modeling and performance monitoring of a photovoltaic–thermal (PVT) water collector. **Solar Energy**, v. 112, p. 85-99, 2015.
- BANISTER, C. J.; WAGAR, W. R.; COLLINS, M. R. Validation of a single tank, multi-mode solar-assisted heat pump TRNSYS model. **Energy Procedia**, 2014. 499 – 504.
- 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.
- CELESC. Tarifas e taxas de energia, 2023. Acesso em: 3 Julho 2023.
- CEMIG. VALORES DE TARIFAS E SERVIÇOS, 2023. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>>. Acesso em: 3 Julho 2023.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- CHOW, T. T. et al. Energy and exergy analysis of photovoltaic–thermal collector with and without glass cover. **Applied Energy**, v. 86, n. 3, p. 310-316, 2009.
- CHOW, T. T.; HE, W.; JI, J. Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application. **Solar energy**, v. 80, n. 3, p. 298-306, 2006.
- 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.
- DO NASCIMENTO, L. R. E. A. Extreme solar overirradiance events: Occurrence and impacts on utility-scale photovoltaic power plants in Brazil. **Solar Energy**, v. 186, p. 370-381, 2019.
- DUBEY, S.; TIWARI, G. N. Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater. **Solar energy**, v. 82, n. 7, p. 602-612, 2008.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 4<sup>a</sup>. 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.

EPE. **Balanco Energético Nacional**. Brasília: Ministério de Minas e Energia - MME, 2023.

FLORSCHUETZ, L. W. Extension of the Hottel-Whillier Model to the Analysis of Combined Photovoltaic/Thermal flat plate collectors. **Solar Energy**, 1979. 361–366.

FRAISSE, G.; MÉNÉZO, C.; JOHANNES, K. Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type. **Solar Energy**, v. 81, n. 11, p. 1426-1438, 2007.

HUANG, B. J. et al. PERFORMANCE EVALUATION OF SOLAR PHOTOVOLTAIC/THERMAL SYSTEMS. **Solar energy**, v. 70, n. 5, p. 443-448, 2001.

INMET. **Base de Dados Meteorológicos**, 2022. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 2023 Junho 01.

JI, J. et al. A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. **Applied Energy**, v. 84, n. 2, p. 222-237, 2007.

JUNIOR, E. E. B.; RODRIGUES, L. J. **Coletor Híbrido Térmico Fotovoltaico: Revisão de Simulações e Dimensionamentos**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. [S.l.]: [s.n.]. 2018.

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.

LÄMMLE, M. et al. PVT collector technologies in solar thermal systems: A systematic assessment of electrical and thermal yields with the novel characteristic temperature approach. **Solar Energy**, v. 155, p. 867-879, 2017.

LI, H.; SUN, L.; ZHANG, Y. Performance investigation of a combined solar thermal heat pump heating system. **Applied Thermal Engineering**, 2014. 460-468.

LIANG, R.; ZHANG, J.; ZHOU, C. Dynamic Simulation of a Novel Solar Heating System Based on Hybrid Photovoltaic/Thermal Collectors (PVT). **Procedia Engineering**, 2015. 675 – 683.

LU, S. et al. Refrigeration characteristics of a hybrid heat dissipation photovoltaic thermal heat pump under various ambient conditions on summer night. **Renewable Energy**, Dalian, Julho 2020. 2524e2534.

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.

NEOENERGIABRASILIA. Tarifas, 2023. Disponível em: <<https://www.neoenergiabrasilia.com.br/residencial-e-rural/Paginas/tarifas.aspx>>. Acesso em: 3 Julho 2023.

NEOENERGIAPERAMBUCO. Informações de Tarifas Grupo B, 2023. Disponível em: <<https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/residencial-rural/Pages/Alta%20Tens%C3%A3o/tarifas-grupo-a.aspx>>. Acesso em: 3 Julho 2023.

NREL. Glossary of solar radiation resource terms: National Renewable Energy Laboratory, 2022. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/solar-glossary.html>>. Acesso em: 01 Abril 2022.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: Inpe, v. 1, 2017.

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.

TESS. **TESS Component Library, version 16**. Madison: Thermal Energy System Specialists, LLC, 2004.

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](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.

TRNSYS. **TRNSYS 16: A Transient System Simulation Program - Volume 5: Mathematical Reference**. Madison: University of Wisconsin, 2007.

VIANA, P. R. **Avaliação experimental de um protótipo de coletor solar híbrido para geração simultânea de água quente e eletricidade**. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. [S.l.]. 2014.

YAZDANPANAHI, J.; SARHADDI, F.; ADELI, M. M. Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses. **Solar Energy**, v. 118, p. 197-208, 2015.

ZHANG, S. et al. Field experimental investigation on electricity and thermal performances of a large scale photovoltaic solar-thermal direct expansion heat pump system. **Energy Conversion and Management**, Hefei, 01 Setembro 2022. 115941.

ZHOU, C. et al. Experimental study on the cogeneration performance of roll-bond-PVT heat pump system with single stage compression during summer. **Applied Thermal Engineering**, Dalian, 25 Fevereiro 2019. 249-261.

ZUKOWSKI, M.; JEZIERSKI, W. New Deterministic Mathematical Model for Estimating the Useful Energy Output of a Medium-Sized Solar Domestic Hot Water System. **Energies**, 11 Maio 2021. 2753.

## APÊNDICE A – Arquivo externo da bomba de calor Trane EXW 060

Tabela A 1 – Dados da bomba de calor Trane EXW 060 para o Type668 (continua)

$T_{load,in}$ (°C)	$T_{source,in}$ (°C)	Capacidade de aquecimento (kW)	Potência (kW)
15,56	-3,89	13,53	2,83
15,56	1,67	15,88	2,82
15,56	7,22	18,19	2,83
15,56	12,78	20,59	2,87
15,56	23,89	26,24	2,98
15,56	29,44	29,70	3,03
15,56	55,00	33,16	3,08
15,56	55,10	12,20	0,05
15,56	70,00	13,36	0,05
21,11	-3,89	13,33	3,25
21,11	1,67	15,61	3,24
21,11	7,22	17,84	3,27
21,11	12,78	20,18	3,31
21,11	23,89	25,63	3,42
21,11	29,44	29,00	3,48
21,11	55,00	32,37	3,57
21,11	55,10	11,91	0,05
21,11	70,00	13,03	0,05
26,67	-3,89	13,09	3,73
26,67	1,67	15,32	3,72
26,67	7,22	17,52	3,74
26,67	12,78	19,77	3,78
26,67	23,89	25,01	3,89

Tabela A 1 – Dados da bomba de calor Trane EXW 060 para o Type668 (continua)

$T_{load,in}$ (°C)	$T_{source,in}$ (°C)	Capacidade de aquecimento (kW)	Potência (kW)
26,67	29,44	28,26	3,95
26,67	55,00	31,52	4,01
26,67	55,10	11,59	0,05
26,67	70,00	12,67	0,05
32,22	-3,89	12,89	4,26
32,22	1,67	15,06	4,25
32,22	7,22	17,16	4,27
32,22	12,78	19,33	4,31
32,22	23,89	24,37	4,41
32,22	29,44	27,53	4,46
32,22	55,00	30,70	4,51
32,22	55,10	11,29	0,05
32,22	70,00	12,34	0,05
37,78	-3,89	12,65	4,88
37,78	1,67	14,76	4,86
37,78	7,22	16,81	4,87
37,78	12,78	18,89	4,89
37,78	23,89	23,75	4,98
37,78	29,44	26,77	5,02
37,78	55,00	29,79	5,06
37,78	55,10	10,93	0,05
37,78	70,00	11,94	0,05
43,33	-3,89	12,48	5,59
43,33	1,67	14,50	5,55
43,33	7,22	16,46	5,55

Tabela A 1 – Dados da bomba de calor Trane EXW 060 para o *Type668* (conclusão)

$T_{load,in}$ (°C)	$T_{source,in}$ (°C)	Capacidade de aquecimento (kW)	Potência (kW)
43,33	12,78	18,45	5,57
43,33	23,89	23,11	5,62
43,33	29,44	26,04	5,65
43,33	55,00	28,97	5,68
43,33	55,10	10,63	0,05
43,33	70,00	11,61	0,05

Fonte: o autor.