

**Avaliação do desempenho de um sistema híbrido de painel
fotovoltaico e bomba de calor para aquecimento de água aproveitando
a irradiação solar no estado de Minas Gerais.**

Giovanni Augusto Petrucci

Itajubá, 18 de julho de 2023

Giovanni Augusto Petrucci

Avaliação do desempenho de um sistema híbrido de painel fotovoltaico e bomba de calor para aquecimento de água aproveitando a irradiação solar no estado de Minas Gerais.

Defesa da Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Sistemas energéticos

Orientador: Prof. Dr. Juan José Garcia Pabon

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Machado

Itajubá, 18 de julho de 2023

RESUMO

Esta dissertação explora a eficiência e viabilidade de um sistema híbrido de painel fotovoltaico e bomba de calor para o aquecimento de água, capitalizando a irradiação solar disponível no estado de Minas Gerais, Brasil. Inicialmente, realizamos uma revisão das tecnologias de energia solar e bomba de calor. O estudo faz comparação com três cenários, somente o sistema PV-T com bomba de calor em comparação com a junção dos sistema PV convencional e aquecedor a vácuo, e o PV convencional gerando energia apenas para o chuveiro, Cenário 1 se mostrou o mais eficiente, apesar do maior investimento inicial (R\$ 16.639,49). Este cenário produziu 544 kWh de energia elétrica e térmica e apresentou o menor LCOE (R\$ 2,79). Em contraste, o Cenário 2, apesar do seu elevado CAPEX e OPEX, produziu apenas 78 kWh de energia e exibiu o LCOE mais alto (R\$ 38,91). O Cenário 3, com o menor CAPEX, produziu 174 kWh de energia e teve um LCOE de R\$ 6,16. Os resultados provam que este sistema híbrido é capaz de fornecer uma quantidade significativa de aquecimento de água durante todo o ano, cerca de 521 kWh de energia térmica gerada aproximadamente 2 vezes a energia térmica gerada pelo sistema AQS a vácuo, ou seja, aproveita de forma eficaz a alta irradiação solar na região. O sistema mostrou-se eficaz em termos de economia de energia, aumento na eficiência do painel fotovoltaico, e uma ótimo aproveitamento da energia térmica, em comparação com os outros sistemas. A geração de energia do sistema estudado em comparação com o sistema fotovoltaico convencional é aproximadamente 4 vezes a do convencional, e essa energia gerada supri a energia consumida pela bomba de calor. O estudo mostra que o sistema híbrido PV-T com bombas de calor é uma das possíveis soluções na transição para um futuro energético mais sustentável e menos dependente de combustíveis fósseis.

Palavras-chave: Sistema PV/T à base de refrigerante, bomba de calor, eficiência e análise econômica.

ABSTRACT

This dissertation delves into the efficiency and feasibility of a hybrid system comprising photovoltaic panels and a heat pump for water heating, harnessing the available solar irradiation in the state of Minas Gerais, Brazil. Initially, we conduct a review of solar energy and heat pump technologies. The study compares three scenarios: the PV-T system with a heat pump, the combination of a conventional PV system with a vacuum heater, and the conventional PV system solely powering the shower. Scenario 1 proves to be the most efficient, despite the higher initial investment (R\$ 16,639.49). This scenario produces 544 kWh of electrical and thermal energy and exhibits the lowest LCOE (R\$ 2.79). In contrast, Scenario 2, despite its elevated CAPEX and OPEX, generates only 78 kWh of energy and demonstrates the highest LCOE (R\$ 38.91). Scenario 3, with the lowest CAPEX, produces 174 kWh of energy and has an LCOE of R\$ 6.16. The results demonstrate that this hybrid system is capable of providing a significant amount of water heating throughout the year, approximately 521 kWh of thermal energy generated, which is roughly 2 times the thermal energy generated by the vacuum water heating system, effectively capitalizing on the region's high solar irradiation. The system proves to be effective in terms of energy savings, increased photovoltaic panel efficiency, and optimal utilization of thermal energy compared to other systems. The energy generation of the studied system, when compared to the conventional photovoltaic system, is approximately 4 times greater, and this generated energy supplies the energy consumed by the heat pump. The study highlights that the PV-T hybrid system with heat pumps is one of the possible solutions in transitioning towards a more sustainable energy future, less dependent on fossil fuels.

Key-Words: Refrigerant-based PV/T system, heat pump, efficiency and economic analysis.

Sumário

RESUMO	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Argumentação do problema.....	14
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivos específicos	15
1.3 Estrutura da dissertação.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Marco conceitual.....	16
2.2 Ciclo de refrigeração	16
2.3 Painel fotovoltaico convencional	18
2.4 Perfil do consumo de energia elétrica residencial.....	19
2.5 Recurso solar e dados solarimétricos.	21
2.6 Tecnologias existentes de sistemas PV-T com bombas de calor	22
2.6.1 Bomba de calor expansão indireta no PV-T.	22
2.6.2 Sistemas de PV-T com bomba de calor de expansão direta.....	25
3 METODOLOGIA	37
3.1 Dados solarimétricos.....	37
3.2 Irradiação	38
3.3 Temperatura de trabalho do painel fotovoltaico convencional	41
3.4 Cálculo da Potência elétrica gerada.....	42
3.5 Evaporador	42
3.6 Compressor	44
3.7 Condensador	45
3.8 Modelamento do sistema PV-T e bomba de calor	46
3.9 Fluxograma.....	47
3.10 AQS	48
3.11 Chuveiro elétrico.....	48
3.12 Parâmetro de viabilidade econômica	49
3.13 Parâmetros iniciais do projeto	50
4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA	53
4.1 Seleção do painel fotovoltaico.....	53
4.2 Inversor senoidal pura e Controlador de carga	53

4.3	Dimensionamento do tanque.....	54
4.4	Dimensionamento do compressor	56
4.5	Dimensionamento do evaporador.....	58
4.6	Dimensionamento do condensador.....	59
4.7	Aquecedor solar a vácuo (AQS)	60
5	RESULTADOS.....	62
5.1	Chuveiro elétrico.....	62
5.2	Sistema de aquecedor solar a vácuo	62
5.3	Sistema fotovoltaico	70
5.4	Sistema PV-T com bomba de calor	75
5.5	Análise econômica	84
5.6	Análise de cenários.....	89
6.	CONCLUSÃO	91
	REFERENCIAS	92

Lista de Figura

Figura 2.1- Ciclo de refrigeração (ÇENGEL; BOLES, 2011).....	17
Figura 2.2 - Sistema híbrido PV-T utilizando o R407C (OBALANLEGE <i>et al.</i> , 2020)..	23
Figura 2.3 - Sistema de bomba de calor PV-T de ar (WANG <i>et al.</i> , 2015).....	24
Figura 2.4 - Sistema PV-T de expansão indireta com reservatório de compensação (ÖZTÜRK; ÇALIŞIR; GENÇ, 2021).....	25
Figura 2.5 - Sistema de bomba de expansão direta para edifícios (JAMES <i>et al.</i> , 2021).	26
Figura 2.6 - Sistema PV-T com tubo aletado (DU <i>et al.</i> , 2021).	27
Figura 2.7 - sistema de bomba de calor de absorção solar fotovoltaica (ZHANG <i>et al.</i> , 2022).	28
Figura 2.8 - Sistema PV-T de dupla condensação (SONG <i>et al.</i> , 2023).....	29
Figura 2.9 - Sistema PV-T expansão direta em serie (SEZEN; GUNGOR, 2023).....	30
Figura 2.10 - Sistema PV-T expansão direta paralela (SEZEN; GUNGOR, 2023).	31
Figura 2.11 - Sistema PV-T expansão direta com fonte dupla (SEZEN; GUNGOR, 2023).....	31
Figura 2.12 - Sistema PV-T para aquecimento de água (AMMAR <i>et al.</i> , 2013).	32
Figura 2.13 - Sistema de expansão direta para um tanque de 110L (VALENCIA- CAÑOLA <i>et al.</i> , 2023).....	34
Figura 2.14 - Sistema PV-T expansão direta com duplo gás (VAISHAK; BHALE, 2021).	35
Figura 3.1- Sistema híbrido PV-T/BC para aquecimento de água com armazenamento de energia (Autor).	37
Figura 3.2 - Irradiação direta, difusa e refletida respectivamente (DUFFIE; BECKMAN; MCGOWAN, 1985).	40
Figura 3.3 – Diagrama de blocos do PV-T com BC.	47
Figura 3.4 - Evaporador acoplado ao painel fotovoltaico.....	51
Figura 3.5 - Compressor.....	51
Figura 3.6 - Desenho de um compressor imerso em um tanque com água.....	52
Figura 4.1 - Ciclo de refrigeração do fluido.	57
Figura 4.2- Imagem do compressor.	58
Figura 4.3- Esquema de montagem da serpentina.	59
Figura 4.4- Diferença de temperatura entre os fluidos.	60

Figura 5.1- Temperatura ambiente e do tanque para o dia 20/03/2022.	63
Figura 5.2 - Das potência e irradiação para o dia 20/03/2022.	64
Figura 5.3 - Temperatura ambiente e do tanque para o dia 21/06/2022.....	65
Figura 5.4 - Das potências e irradiação para o dia 21/06/2022.	65
Figura 5.5 – Temperatura ambiente e do tanque para o dia 23/09/2022.	66
Figura 5.6 - Das potências e irradiação para o dia 23/09/2022.	67
Figura 5.7 - Temperatura ambiente e do tanque, para o dia 22/12/2022.....	68
Figura 5.8 - Das potências e irradiação, para o dia 22/12/2022.	68
Figura 5.9 – Potências e irradiação para o dia 20/03/2022.	70
Figura 5.10 – Temperaturas ambiente e do PV para o dia 20/03/2022.	71
Figura 5.11 - Potência e irradiação solar para o dia 21/06/2022.	71
Figura 5.12 – Temperaturas ambiente e do PV para o dia 21/06/2022.	72
Figura 5.13 – Potências e irradiação solar para o dia 23/09/2022.	72
Figura 5.14 - Temperaturas ambiente e do PV para o dia 23/09/2022.....	73
Figura 5.15 – Potências e irradiação solar para o dia 22/12/2022.	73
Figura 5.16 - Temperaturas ambiente e do PV para o dia 22/12/2022.....	74
Figura 5.17 - Temperaturas do sistema PV-T com BC.....	75
Figura 5.18 - Temperaturas do sistema PV-T com BC.....	76
Figura 5.19 - Temperaturas do sistema PV-T com BC.....	76
Figura 5.20 - Temperaturas do sistema PV-T com BC.....	77
Figura 5.21 - Potências, Trabalho do compressor e irradiação solar da PV-T com bomba de calor.....	78
Figura 5.22 - Potências, Trabalho do compressor e irradiação solar PV-T com bomba de calor.....	78
Figura 5.23 - Potências, Trabalho do compressor e irradiação solar PV-T com bomba de calor.....	79
Figura 5.24 - Potências, Trabalho do compressor e irradiação solar PV-T com bomba de calor.....	79
Figura 5.25 - Eficiência do PV e COP da PV-T com bomba de calor.....	80
Figura 5.26 - Eficiência do PV e COP da PV-T com bomba de calor.....	81
Figura 5.27 - Eficiência do PV e COP da PV-T com bomba de calor.....	82
Figura 5.28 - Eficiência do PV e COP da PV-T com bomba de calor.....	82
Figura 5.29 - Valor do LCOE para cada sistema.	88

Lista de Tabelas

Tabela 4.1- Consumo de pontos de água quente.....	55
Tabela 4.2 - Dados extraídos do software Coolpack.....	56
Tabela 5.1- Média mensal e anual do consumo do chuveiro.	62
Tabela 5.2– Médias do sistema de AQS a vácuo.	69
Tabela 5.3 - Médias da energia elétrica.....	74
Tabela 5.4 – Médias das máximas da temperatura.	83
Tabela 5.5 - Médias de geração do sistema PV-T bomba de calor.	84
Tabela 5.6 - Tarifas CEMIG-D consumidor residencial normal (CEMIG-D, 2023)	85
Tabela 5.7 – Tarifas CEMIG-D ao longo dos 13 anos (ANEEL, 2023).....	86
Tabela 5.8 – CAPEX sistema híbrido.	86
Tabela 5.9 – CAPEX aquecedor solar a vácuo.	87
Tabela 5.10 – CAPEX sistema PV convencional.....	87
Tabela 5.11 – OPEX dos sistemas	87
Tabela 5.12 – Preço do LCOE ao longo dos anos.....	88
Tabela 5.13 – Análise de cenários.....	89

Nomenclatura

A	Área
C_b	Coeficiente de contato
E	Energia
HT	Coeficiente de transferência de calor
h	Entalpia
I	Irradiação
m	Massa
P	Potência
R_b	Ângulo de irradiação difusa
R_d	Ângulo irradiação difusa
Q	Energia térmica do painel fotovoltaico
T	Temperatura
U	Coeficiente global de transferência de calor
V	Volume
W	Trabalho
w'	Espaçamento da tubulação
α	Absorção, difusividade térmica
β	Inclinação do painel fotovoltaico
η	Eficiência
ρ	Densidade
ω	Ângulo horário
ϕ	Latitude
Δ	Variação
τ	Transmitância
δ	Declinação

Siglas

CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CAPEX	Custo Inicial de Instalação
IRN	Instituto de recursos naturais
LCOE	Custo nivelado da energia
NOCT	Temperatura nominal de operação da célula
OPEX	Custo de operação e manutenção
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

1. INTRODUÇÃO

A transição energética tem se tornado um assunto de extrema importância no cenário global atual. A ameaça aos recursos naturais e o crescente aumento das emissões de dióxido de carbono na atmosfera, como apontado pela ONU, têm se transformado em um problema de escala mundial. Diante desse contexto, torna-se crucial não apenas estudar a geração de energia, mas também explorar formas mais eficientes de utilizá-la. O Brasil, por possuir um grande potencial para aproveitar fontes de energia renovável, em especial a energia solar, destaca-se nesse cenário (HINRICHS; KLEINBACH, 2019).

Wills e Westin (2018) considerada a matriz energética do Brasil como uma das mais limpas do mundo. O Brasil é reconhecido por seu compromisso com fontes renováveis de energia, as quais representam cerca de 42% do fornecimento total de energia primária e 85% da produção do setor elétrico. O país apresenta um amplo potencial em fontes como energia hidrelétrica, eólica, biomassa e solar.

Losekann e Tavares (2019) considera que a maioria dos sistemas energéticos atuais está fundamentada em fontes fósseis, que são grandes emissoras de carbono, a reestruturação desses sistemas implica em desafios que exigem políticas energéticas adequadas para apoiar essa transformação. Tradicionalmente, as políticas energéticas têm se voltado para a busca da segurança no abastecimento, acesso à energia a preços acessíveis e produção e uso ambientalmente adequados. No entanto, em um contexto que busca atender aos objetivos climáticos, as políticas energéticas precisam convergir para uma transição energética de baixo carbono, priorizando quatro estratégias de desenvolvimento energético: expansão energética, reprodução energética, substituição energética e eficiência energética.

A crise energética enfrentada pelo setor hidrelétrico e pelo aquecimento global atualmente tem impulsionado um interesse na cogeração, especialmente para instalações industriais, edifícios comerciais e aplicações rurais. A cogeração é um processo tecnológico que combina a produção de energia elétrica e/ou mecânica com a geração de energia térmica útil. Essa combinação resulta em economia significativas de energia se comparada às tecnologias convencionais de geração de energia elétrica e térmica separadas (RAJ; INIYAN; GOIC, 2011).

Entre as tecnologias promissoras nesse contexto, destaca-se a tecnologia híbrida fotovoltaica/térmica (PV-T). Esse sistema tem a capacidade de coletar simultaneamente eletricidade e energia térmica, tornando-se uma opção atrativa. A energia fotovoltaica (PV) é considerada um dos métodos mais ecológicos para gerar eletricidade. No entanto, ainda persiste o desafio da eficiência na conversão relativamente é baixa. Entre os vários fatores que impactam negativamente o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, a temperatura de operação desempenha um papel significativo. A temperatura ideal para que as células fotovoltaicas operem com eficiência é de cerca de 25 °C. Infelizmente, em regiões subtropicais, particularmente durante as horas de pico do sol, a temperatura operacional dos painéis fotovoltaicos pode atingir 60 a 80 °C. Consequentemente, os pesquisadores têm trabalhado no desenvolvimento de técnicas de gerenciamento térmico passivo e ativo para resolver esse problema (VAISHAK; BHALE, 2021).

Entre os sistemas ativos, existe um conhecido como sistema PV-T baseado em refrigerante, que envolve a integração das serpentinas do evaporador de uma bomba de calor e um módulo PV para criar um sistema de cogeração chamado bomba de calor fotovoltaica/térmico-solar assistida (PV-T-SAP). Ter uma alta temperatura do evaporador é benéfico para a operação da bomba de calor, mas a eficiência de conversão de uma célula fotovoltaica diminui à medida que a temperatura operacional aumenta. Neste contexto, um evaporador de bomba de calor e um módulo fotovoltaico podem ser combinados como um único módulo para criar um sistema híbrido. Durante a operação, o excesso de energia térmica no módulo fotovoltaico atua como fonte de calor para a evaporação do refrigerante. Este processo de evaporação reduz a temperatura operacional do módulo fotovoltaico, levando a um melhor desempenho, enquanto o calor extraído pode ser usado para aplicações de aquecimento de baixa temperatura.

Um sistema PV-T (fotovoltaico-térmico) com uma bomba de calor é uma tecnologia combinada que tem como objetivo melhorar a eficiência geral de um painel fotovoltaico. Com base nos estudos de Dubey et al. (2009) e Chow (2010), esses sistemas operam aproveitando o calor residual gerado pelo painel fotovoltaico para aquecer ou resfriar um ambiente. A bomba de calor, por sua vez, melhora ainda mais a eficiência do sistema, pois aumenta a quantidade de energia térmica que pode ser extraída. Isso não apenas resulta em melhor aproveitamento da energia solar

incidente, mas também pode melhorar a eficiência elétrica do painel fotovoltaico. Isso ocorre porque as células fotovoltaicas operam com maior eficiência em temperaturas mais baixas, então qualquer calor removido do painel pode melhorar sua performance (OBALANLEGE *et al.*, 2020)

1.1 Argumentação do problema

A combinação do sistema híbrido fotovoltaico-térmico (PV-T) com bomba de calor para aquecimento de água nas residências brasileiras representa uma solução promissora para otimizar o uso da energia solar. Substituindo o sistema de aquecimento pode-se reduzir o consumo de energia elétrica usada pelos sistemas de aquecimento elétricos, ou reduzir a emissões de CO_2 dos aquecedores a gás. Por outro lado, também é possível maximizar o aproveitamento de espaço disponível nos tetos das casas, uma vez que o sistema PV/T usa a mesma área para produzir eletricidade e calor, diferente da solução convencional de utilizar por separado uma área para geração fotovoltaica e outra área para instalação de coletores solares para aquecimento de água. No entanto, enfrenta desafios a integração e compatibilidade entre os sistemas PV-T e as bombas de calor, além dos custos e viabilidade econômica. Sendo assim, esta dissertação propõe estudar o potencial energético do sistema PV-T com bomba de calor em condições do clima da cidade de Itajuba/MG, Brasil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Realizar uma avaliação em termos energéticos e econômicos, de um sistema híbrido de geração de energia elétrica e térmica usando painel PV-T e bomba de calor por expansão direta e comparar com outras tecnologias usadas para o mesmo tipo de geração.

1.2.2 Objetivos específicos

- Dimensionar do sistema PV-T e bomba de calor, envolve a coleta de dados, como demanda térmica, irradiação solar, temperatura ambiente e desejada. Com base nesses dados, calcula-se a demanda térmica e dimensiona-se o sistema fotovoltaico e a bomba de calor. Um painel fotovoltaico convencional, e um coletor solar também para fins de comparação.
- Elaborar modelos matemáticos para três cenários:
 - Cenário 1: Sistema PV-T e bomba de calor;
 - Cenário 2: Painel PV funcionando de forma convencional sem resfriamento e o coletor solar para aquecimento de água;
 - Cenário 3: Painel PV funcionando de forma convencional e o chuveiro elétrico para aquecimento de água.
- Conduzir análises energéticas para identificar potenciais e eficiências de cada cenário;
- Realizar análises econômicas detalhadas utilizando o Custo Nivelado de Energia (LCOE) para avaliar a competitividade econômica e a viabilidade financeira entre os cenários.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação se divide em 6 capítulos, sendo o capítulo 1 a introdução, o capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o ciclo de refrigeração, painel fotovoltaico, sistemas de aquecimento de água para uso residencial com o auxílio de sistemas de coletor solar e painel fotovoltaico integrados a uma bomba de calor. O capítulo 3 destina-se à descrição da metodologia, quais as equações utilizadas para desenvolver o sistema. No capítulo 4 detalha-se as etapas do desenvolvimento do projeto. O capítulo 5 descreve os resultados. No capítulo 6 é apresentado a conclusão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica sobre sistemas Fotovoltaico-Térmicos (PV-T) com bomba de calor investiga as tecnologias que combinam a geração de eletricidade fotovoltaica e a coleta de energia térmica, maximizando a eficiência energética ao aproveitar tanto a luz solar quanto o calor normalmente desperdiçado pelo painel fotovoltaico. Estes sistemas alimentam bombas de calor, dispositivos que transferem calor de um fluido para o outro, tornando-se autossuficientes em energia.

2.1 Marco conceitual

Refrigeração é um processo que transfere calor de um ambiente para outro. Painéis fotovoltaicos convertem energia solar em energia elétrica para alimentar sistemas de aquecimento de água. A combinação desses dois processos pode resultar em um sistema eficiente de aquecimento de água por meio de energia renovável.

2.2 Ciclo de refrigeração

O ciclo, mostrado na Figura 2.1, é um processo termodinâmico empregado em diversos sistemas de refrigeração, como geladeiras, ar-condicionado e freezers, com o propósito de transferir calor de um ambiente frio para um ambiente quente. O principal objetivo dessa transferência de calor é manter um espaço em uma temperatura mais baixa do que a de seu ambiente. Entre os diversos tipos de ciclos de refrigeração, o ciclo de compressão a vapor é o mais comum e consiste em quatro etapas principais: evaporação, compressão, condensação e expansão (ÇENGEL; BOLES, 2011).

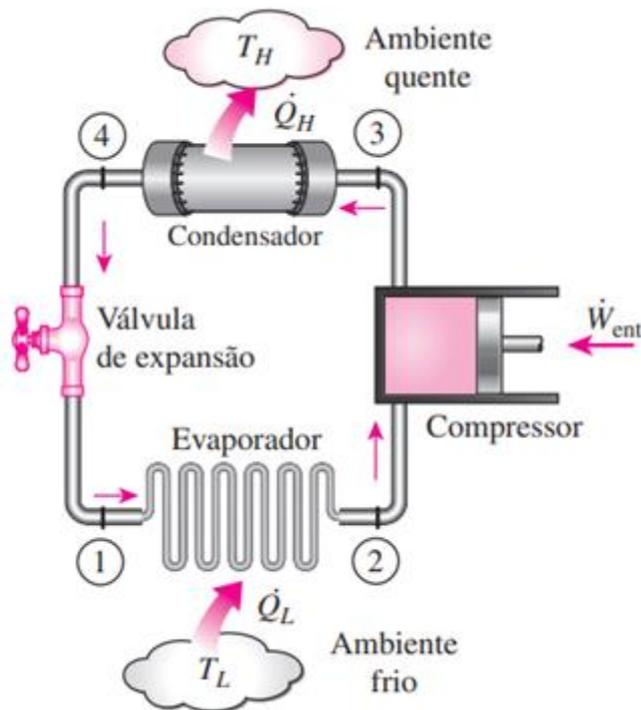


Figura 2.1- Ciclo de refrigeração (ÇENGEL; BOLES, 2011).

A primeira etapa, a evaporação, ocorre quando o refrigerante, um fluido com propriedades específicas, absorve o calor do espaço a ser resfriado. Inicialmente, o refrigerante está no estado líquido e, ao absorver calor, evapora, transformando-se em vapor de baixa pressão e temperatura. Essa etapa acontece no evaporador, onde a troca de calor entre o refrigerante e o ar ou a substância a ser resfriada é efetuada (ÇENGEL; BOLES, 2011).

Em seguida, na etapa de compressão, o vapor de baixa pressão e temperatura geradas na fase anterior é conduzido ao compressor. Este equipamento é responsável por elevar a pressão e a temperatura do vapor, convertendo-o em vapor de alta pressão e temperatura. O processo de compressão adiciona energia ao sistema na forma de trabalho mecânico (ÇENGEL; BOLES, 2011).

A terceira etapa, a condensação, envolve o vapor de alta pressão e temperatura, que agora possui uma maior quantidade de energia térmica, adentrando no condensador. Este componente é um trocador de calor que possibilita a liberação do calor do vapor para o ambiente externo, normalmente por meio da troca de calor com o ar ou a água. Conforme o vapor perde calor, ele se condensa e retorna ao estado líquido de alta pressão (ÇENGEL; BOLES, 2011).

Por fim, a etapa de expansão acontece quando o líquido de alta pressão passa por um dispositivo de expansão, como uma válvula de expansão ou um tubo capilar. Esse processo reduz a pressão e a temperatura do líquido antes de retornar ao evaporador. Durante essa redução de pressão, parte do líquido se converte em vapor e a mistura resultante de líquido e vapor de baixa pressão e temperatura retorna ao evaporador, iniciando um novo ciclo de refrigeração (ÇENGEL; BOLES, 2011).

Dessa forma, o ciclo de refrigeração ocorre de maneira contínua, permitindo que o sistema mantenha uma temperatura mais baixa no espaço desejado. Embora existam outras variações do ciclo de refrigeração, como o ciclo de absorção e o ciclo de refrigeração por compressão de gás, o ciclo de compressão a vapor é o mais utilizado e conhecido.

2.3 Pannel fotovoltaico convencional

O avanço tecnológico na indústria de energia solar permitiu o desenvolvimento de várias tecnologias de painéis fotovoltaicos, cada uma com suas características específicas. Tais painéis são dispositivos que transformam a energia solar em eletricidade e, atualmente, incluem tecnologias como silício monocristalino (c-Si), silício policristalino (mc-Si ou p-Si), telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), células solares orgânicas (OPV), células solares de perovskita e células solares de concentração (CPV) (PARIDA; INIYAN; GOIC, 2011a).

Os painéis de silício monocristalino são conhecidos por sua estrutura cristalina uniforme e maior eficiência energética, variando entre 18% e 22%. No entanto, o processo de fabricação é mais caro e menos eficiente em termos de materiais se comparado a outras tecnologias. Já os painéis de silício policristalino possuem uma estrutura cristalina menos uniforme, com eficiência energética entre 15% e 18%. Apesar da menor eficiência, sua fabricação é mais barata e eficiente em termos de materiais. Essa tecnologia é a mais utilizada devido ao custo de fabricação ser mais barato (PARIDA; INIYAN; GOIC, 2011b).

A tecnologia de telureto de cádmio, por outro lado, utiliza células solares feitas de telureto de cádmio, com eficiência média entre 11% e 14%. Embora mais baratos de fabricar do que os painéis de silício cristalino, o uso de cádmio, um elemento tóxico, levanta preocupações ambientais e de saúde. Os painéis CIGS são outra opção de

tecnologia de filme fino que emprega uma mistura de elementos semicondutores, apresentando eficiências de 12% a 16% e potencial para custos mais baixos de fabricação. Entretanto, a escassez de índio e gálio pode limitar a expansão dessa tecnologia (PARIDA; INIYAN; GOIC, 2011b).

As células solares orgânicas (OPV - Organic solar cells) e as células solares de perovskita representam tecnologias emergentes no campo da energia fotovoltaica. As OPVs têm eficiências mais baixas, entre 3% e 12%, mas oferecem vantagens como flexibilidade, leveza e potencial para fabricação em larga escala e baixo custo. Porém, a estabilidade e durabilidade dessas células ainda são desafios a serem enfrentados. As células solares de perovskita, por sua vez, utilizam materiais semicondutores à base de perovskita e podem alcançar eficiências de até 25%. Embora apresentem potencial para fabricação em larga escala e baixo custo, ainda enfrentam desafios como estabilidade, durabilidade e preocupações ambientais relacionadas ao uso de chumbo (PARIDA; INIYAN; GOIC, 2011b).

Por fim, as células solares de concentração (CPV - Concentrating solar cells) empregam lentes ou espelhos para concentrar a luz solar em uma pequena área de material semicondutor, geralmente silício de alta eficiência ou células multijunção, alcançando eficiências superiores a 40%. No entanto, essa tecnologia é mais adequada para áreas com alta incidência de luz solar direta e exige sistemas de rastreamento solar para manter o foco na luz solar concentrada. Dessa forma, as células CPV podem ser mais complexas e exigir mais manutenção do que outras tecnologias (PARIDA; INIYAN; GOIC, 2011b).

2.4 Perfil do consumo de energia elétrica residencial.

O consumo de energia elétrica residencial é um tema de grande relevância para a sociedade brasileira, uma vez que o consumo de energia elétrica é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e social do país. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia, o consumo de energia elétrica no Brasil cresceu cerca de 2,5% ao ano entre 2010 e 2019. O consumo de energia elétrica residencial no Brasil também tem acompanhado essa tendência, embora com variações regionais e socioeconômicas (MME, 2021).

Diversos fatores podem influenciar o perfil do consumo de energia elétrica residencial no Brasil. Entre eles, destacam-se as condições climáticas, as mudanças tecnológicas, as políticas públicas e os níveis de atividade econômica. No que se refere às condições climáticas, é possível que a intensidade e a frequência de eventos extremos, como secas e ondas de calor, afetem a demanda por energia elétrica para refrigeração, aquecimento e iluminação. De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2021), o Brasil vem sofrendo com eventos climáticos extremos nos últimos anos, o que pode influenciar o consumo de energia elétrica residencial .

Em relação às mudanças tecnológicas, é possível que o aumento do uso de equipamentos eletrônicos e de energia solar residencial afetem a demanda por energia elétrica no setor residencial. Com o avanço da tecnologia e a queda dos preços dos painéis fotovoltaicos, é possível que mais consumidores residenciais passem a gerar a própria energia elétrica, o que pode reduzir a demanda por energia elétrica da rede pública (EPE, 2021).

No que se refere às políticas públicas, é possível que medidas de incentivo à eficiência energética e ao uso de fontes renováveis de energia influenciem o perfil do consumo de energia elétrica residencial (MME, 2021). Em 2020, o governo brasileiro lançou o programa Casa Verde e Amarela, que tem como um dos objetivos incentivar a adoção de sistemas de energia solar em residências. Esse tipo de medida pode influenciar o perfil do consumo de energia elétrica residencial no país nos próximos anos (MDR, 2021).

Por fim, os níveis de atividade econômica também podem influenciar o consumo de energia elétrica residencial. Em momentos de expansão econômica, é possível que a demanda por energia elétrica residencial cresça, especialmente em setores como a indústria e o comércio (EPE, 2021).

Em relação à distribuição do consumo de energia elétrica nas residências brasileiras, diversos estudos e pesquisas, como os realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018) e pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL, 2021), apontam que os principais eletrodomésticos e equipamentos responsáveis pelo consumo são: chuveiros elétricos, geladeiras, ar-condicionado, iluminação, televisores e outros equipamentos eletrônicos.

O chuveiro elétrico é um dos maiores responsáveis pelo consumo de energia elétrica nas residências brasileiras. Estima-se que ele seja responsável por cerca de 25% a 35% do consumo total de energia elétrica em uma residência, variando conforme o clima, o tempo de uso e a potência do aparelho. Esse alto consumo se deve principalmente à necessidade de aquecimento da água, que consome muita energia elétrica (EPE, 2019).

Diante desse cenário, é importante que políticas públicas e iniciativas de conscientização sejam promovidas para estimular a utilização de tecnologias e hábitos mais eficientes no uso da energia elétrica. Algumas alternativas para reduzir o consumo de energia incluem a utilização de sistemas de aquecimento solar de água, a troca de equipamentos antigos e ineficientes por modelos mais eficientes e a adoção de hábitos conscientes, como reduzir o tempo de banho e utilizar a energia elétrica de forma responsável (MME, 2021; PROCEL, 2021).

2.5 Recurso solar e dados solarimétricos.

O Sol é uma fonte inesgotável de energia, capaz de fornecer energia em quantidades muito superiores às necessidades globais atuais. A energia solar é captada e transformada em energia elétrica ou térmica por meio de tecnologias como os painéis fotovoltaicos e os coletores solares térmicos. Para que essas tecnologias sejam eficientes e possam ser implementadas adequadamente, é necessário conhecer o potencial solar de uma região, e é aí que entram os dados solarimétricos (ANEEL, 2021; EPE, 2019; INPE, 2021).

Dados solarimétricos são informações quantitativas e qualitativas relacionadas à energia solar incidente em uma determinada localidade, em um período específico. Esses dados são fundamentais para avaliar o potencial solar de uma região e, conseqüentemente, para dimensionar e projetar sistemas de energia solar de forma eficiente e otimizada. Além disso, os dados solarimétricos são essenciais para a elaboração de políticas públicas e estratégias de incentivo à adoção de energia solar (ANEEL, 2021; EPE, 2019; INPE, 2021).

2.6 Tecnologias existentes de sistemas PV-T com bombas de calor

Os sistemas térmicos fotovoltaicos (PV-T) com bombas de calor são soluções inovadoras que combinam a geração de energia solar e a recuperação de calor residual, maximizando assim a eficiência energética. Os painéis fotovoltaicos de condução de eletricidade, enquanto o calor normalmente dissipado é capturado para usos térmicos. As bombas de calor, por sua vez, utilizam esta energia gerada para aquecimento e condução de forma otimizada. Esses sistemas integrados são particularmente úteis para edifícios e instalações com demandas simultâneas de eletricidade e calor, e seu uso é esperado para crescer à medida que a tecnologia avança e a demanda por energias renováveis aumenta. Neste tópico será apresentado algumas tecnologias existe de sistemas PV-T com bombas de calor.

2.6.1 Bomba de calor expansão indireta no PV-T.

Obalanlege et al. (2020) realizaram uma avaliação de desempenho de um sistema híbrido fotovoltaico-térmico (PV-T) e bomba de calor para aquecimento solar e geração de eletricidade. O artigo descreve o projeto e a análise do sistema híbrido, que combina tecnologias de energia solar térmica e fotovoltaica com uma bomba de calor para maximizar a eficiência energética e a capacidade de produção de energia.

O sistema desenvolvido, ilustrado na Figura 2.3, é composto por um coletor PV-T líquido, no qual o fluido de trabalho (água ou glicol) absorve e transporta a energia térmica gerada pelos painéis fotovoltaicos. A energia térmica é utilizada para alimentar uma bomba de calor, que por sua vez fornece aquecimento de água e ambiente. Simultaneamente, os painéis fotovoltaicos geram eletricidade que pode ser utilizada diretamente ou armazenada em baterias para uso posterior (OBALANLEGE *et al.*, 2020).

Os autores realizaram uma análise detalhada do desempenho do sistema híbrido em diferentes condições climáticas e operacionais, incluindo variações na irradiação solar, temperatura ambiente e carga térmica. Os resultados mostraram que o sistema híbrido PV-T e bomba de calor apresentou um desempenho significativamente melhor do que sistemas convencionais de energia solar térmica e

fotovoltaica separados, o sistema atingiu uma eficiência elétrica média de 11,6% e uma eficiência térmica média de 52,2% (OBALANLEGE *et al.*, 2020).

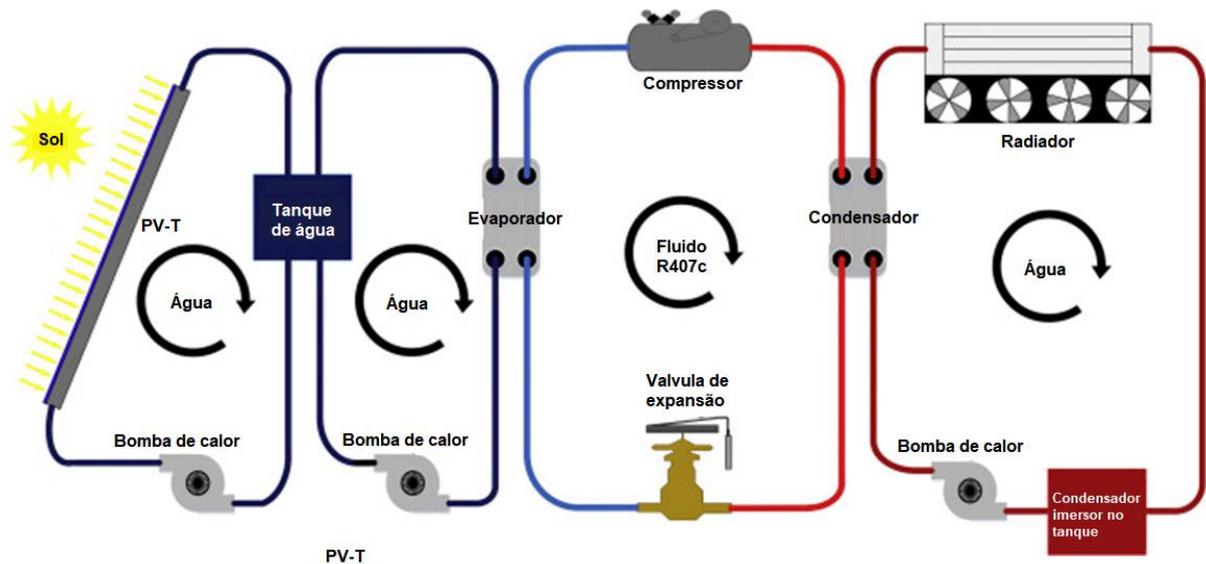


Figura 2.2 - Sistema híbrido PV-T utilizando o R407C (OBALANLEGE *et al.*, 2020).

Além disso, os autores observaram que a integração da bomba de calor no sistema híbrido contribuiu para a redução da temperatura das células fotovoltaicas, melhorando a eficiência elétrica e prolongando a vida útil dos painéis. O estudo também investigou o impacto de diferentes estratégias de controle e parâmetros de operação na eficiência energética e no desempenho do sistema (OBALANLEGE *et al.*, 2020).

Em suma, o trabalho de Obalanlege *et al.* (2020) demonstra o potencial dos sistemas híbridos PV-T e bomba de calor para fornecer aquecimento solar e geração de eletricidade de forma eficiente e sustentável. Este estudo contribui para a compreensão e otimização do desempenho de sistemas híbridos integrados, destacando seu potencial como soluções de energia renovável para residências e edifícios comerciais.

Wang *et al.* (2015) realizaram um estudo experimental sobre um sistema inovador de aquecimento de água que combina tecnologia fotovoltaica-térmica (PV-T) com uma bomba de calor de fonte de ar dupla. O objetivo do estudo era investigar o desempenho e as características operacionais deste sistema híbrido, buscando melhorar a eficiência energética e a taxa de utilização de energia solar.

O sistema proposto pelos autores consiste em um coletor PV-T de ar, responsável por converter a irradiação solar em energia elétrica e térmica, e uma

bomba de calor de fonte de ar dupla. A energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos alimenta a bomba de calor, enquanto a energia térmica coletada é utilizada para aquecer o ar que circula pelo coletor. O ar aquecido é então transferido para a bomba de calor, onde é utilizado para aquecer a água (WANG *et al.*, 2015).

O estudo avaliou o desempenho do sistema híbrido em termos de eficiência energética, taxa de utilização de energia solar e conforto térmico, conforme Figura 2.4. Os autores também analisaram as características operacionais do sistema, incluindo a distribuição de temperatura, a vazão de ar e a potência de saída do painel fotovoltaico (WANG *et al.*, 2015).

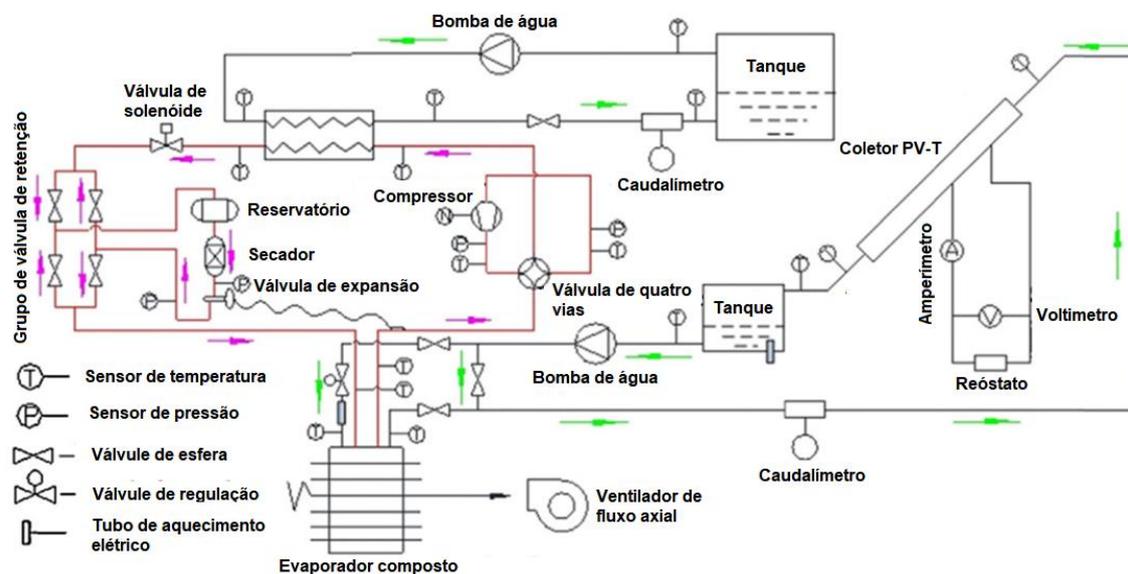


Figura 2.3 - Sistema de bomba de calor PV-T de ar (WANG *et al.*, 2015).

Os resultados do estudo indicaram que o sistema PV-T de ar e a bomba de calor de fonte de ar dupla apresentaram um desempenho superior em comparação com sistemas convencionais de aquecimento de água, alcançando uma maior eficiência energética e uma maior taxa de utilização de energia solar. Além disso, os autores observaram que o sistema híbrido demonstrou uma operação estável e um bom controle de temperatura (WANG *et al.*, 2015).

O artigo proposto por Öztürk, Çalışır, Genç (2021) aborda uma análise energética, exergética e econômica de um sistema de aquecimento de água doméstico assistido por coletores fotovoltaicos/térmicos (PV-T) e bomba de calor. O estudo foi realizado na Turquia, considerando duas cidades com diferentes condições climáticas, Trabzon e Hakkari.

A primeira etapa do estudo, conforme Figura 2.5, consistiu na simulação do sistema (PV-T-HPDHW - Collector-Assisted Heat Pump Domestic Water Heating) ao longo do ano utilizando o programa TRNSYS. Os resultados da simulação foram utilizados para avaliar o desempenho energético mensal do sistema. Em seguida, foi realizada uma análise exérgica convencional com base nos resultados da simulação, determinando as médias de ganho energético e eficiência. Por fim, foi realizada uma análise econômica do sistema considerado, comparando-o com os sistemas convencionais de aquecimento de água elétrica e gás natural (ÖZTÜRK; ÇALIŞIR; GENÇ, 2021).

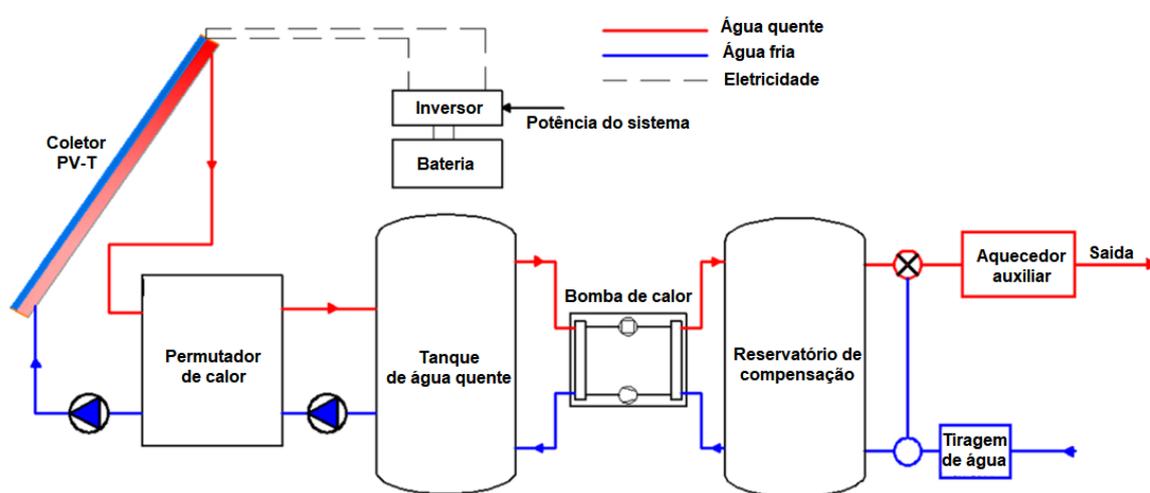


Figura 2.4 - Sistema PV-T de expansão indireta com reservatório de compensação (ÖZTÜRK; ÇALIŞIR; GENÇ, 2021).

Os resultados do estudo apreciaram que o sistema aquecimento de água doméstica com bomba de calor assistida (PV-T-HPDHW) é mais aplicável em Hakkari para aquecimento de água devido ao alto índice de transparência e baixa temperatura média anual. A eficiência exérgica média anual foi de 22,3% para Hakkari e 21,4% para Trabzon. O investimento no sistema PV-T-HPDHW foi considerado viável para Hakkari, mas não para Trabzon (ÖZTÜRK; ÇALIŞIR; GENÇ, 2021).

2.6.2 Sistemas de PV-T com bomba de calor de expansão direta

JAMES *et al.* (2021) uma análise abrangente, conforme Figura 2.6, de um sistema de aquecimento de água de bomba de calor fotovoltaico-térmica (PV-THPWH - Photovoltaic-Thermal Heat Pump Water Heater) baseado em compressor de

acionamento de frequência variável (VFD - Variable Frequency Drive). O estudo visa melhorar a eficiência energética dos edifícios através da redução do consumo de energia do compressor. O sistema incorpora um compressor VFD controlado por feedback e o desempenho é avaliado por meio de análise de energia e exergia.

Os resultados experimentais mostraram que o sistema PV-THPWH reduziu com sucesso a temperatura operacional dos painéis fotovoltaicos, levando a um aumento na potência fotovoltaica e nos indicadores de desempenho. A integração do resfriamento baseado em bomba de calor melhorou significativamente as características elétricas e a potência dos painéis fotovoltaicos. O sistema também demonstrou geração eficiente de água quente (JAMES *et al.*, 2021).

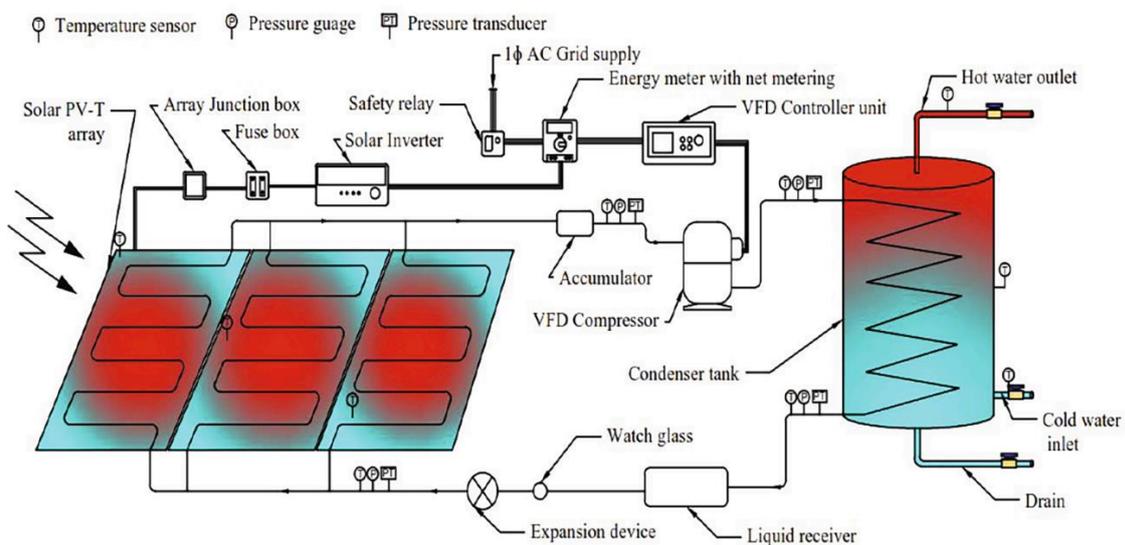


Figura 2.5 - Sistema de bomba de expansão direta para edifícios (JAMES *et al.*, 2021).

A análise incluiu equações para quantificar vários parâmetros, como temperatura da célula fotovoltaica, consumo de energia do compressor, taxa de entrada de energia solar, coeficiente de desempenho e eficiência geral do sistema. A análise exérgica foi realizada para otimizar os parâmetros operacionais do sistema (JAMES *et al.*, 2021).

O estudo também incluiu uma análise econômica, que relatou um curto período de retorno do sistema desenvolvido. O período de payback encontrado foi de 2,3 anos, indicando que o sistema é economicamente viável (JAMES *et al.*, 2021).

DU *et al* (2021), conforme figura 2.7, aborda o desempenho térmico de um sistema híbrido de bomba de calor assistida por energia solar fotovoltaica (PV-TAE -

Photovoltaic Thermal Air Evaporator) em diferentes modos de operação e estações do ano. O sistema consiste em um coletor solar fotovoltaico combinado com um trocador de calor de tubo aletado (TAE - Thermal Air Evaporator) para aproveitar a energia solar e fornecer aquecimento e resfriamento.

Os autores realizaram experimentos em diferentes condições climáticas e modos de operação para avaliar o desempenho do sistema. Eles mediram a irradiação solar, a temperatura ambiente, a potência e a potência do PV-TAE, bem como a temperatura dos módulos fotovoltaicos (DU *et al.*, 2021).

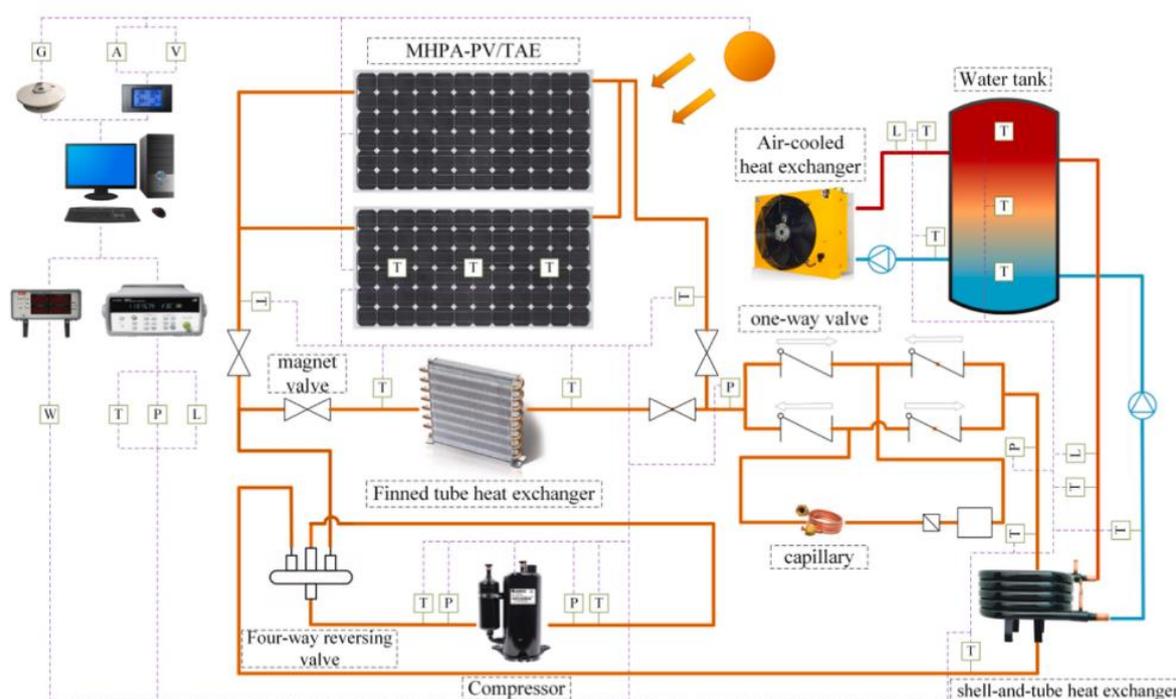


Figura 2.6 - Sistema PV-T com tubo aletado (DU *et al.*, 2021).

Os resultados apreciaram que o sistema PV-TAE apresentou um desempenho significativo tanto no aquecimento quanto no resfriamento. Durante o inverno, o sistema operando no modo SA (bomba de calor assistida por energia solar) teve um desempenho 18,2% melhor do que no modo A (bomba de calor de fonte de ar). Durante a transição das estações e no verão, a faixa de irradiação solar aplicável no modo SA foi aumentada devido ao aumento da temperatura ambiente, permitindo uma utilização eficiente da energia renovável (DU *et al.*, 2021).

Além disso, os autores também analisaram o desempenho do sistema em condições de tempo nublado. Eles observaram que a irradiação solar diminuiu

significativamente devido ao bloqueio das nuvens, afetando a potência e a potência do PV-TAE (DU *et al.*, 2021).

Em resumo, o estudo testado que o sistema híbrido de bomba de calor assistida por energia solar fotovoltaica apresenta um desempenho promissor tanto no aquecimento quanto no resfriamento. Ele permite uma utilização eficiente de energia renovável e pode ser uma solução viável para o fornecimento de energia térmica em diferentes estações do ano e condições climáticas (DU *et al.*, 2021).

O experimento realizado por Zhang *et al.* (2022), conforme representado na Figura 2.8. investigou o desempenho de um sistema de bomba de calor de absorção solar fotovoltaica (DX-SAHP - Direct expansion solar assisted heat pump), integrado a um painel fotovoltaico térmico (PV-T). O foco foi avaliar a produção de energia elétrica, a capacidade de aquecimento e consumo de energia do sistema DX-SAHP, projetado para explorar a energia solar para a produção de eletricidade e aquecimento com o uso de um arranjo PV-T.

A estrutura experimental do sistema foi detalhada no estudo, incluindo a conexão elétrica e o circuito de refrigerante do arranjo PV-T. Instrumentos de monitoramento, como sensores de irradiância solar total, termopares e sensores de temperatura e umidade foram empregados para monitorar parâmetros críticos como temperatura, umidade, pressão, taxa de fluxo, produção de energia, irradiação solar global e consumo de eletricidade (ZHANG *et al.*, 2022).



Figura 2.7 - sistema de bomba de calor de absorção solar fotovoltaica (ZHANG *et al.*, 2022).

Os resultados da pesquisa revelaram que o sistema DX-SAHP foi capaz de produzir eletricidade e oferecer aquecimento de maneira mais eficiente. Os indicadores de eficiência do sistema foram a capacidade de aquecimento, a produção de energia elétrica e o consumo de energia (ZHANG *et al.*, 2022).

Os pesquisadores também destacou a necessidade de desenvolver recursos de armazenamento off-grid para permitir a utilização autônoma em áreas rurais remotas. Além disso, enfatizaram que o sistema DX-SAHP pode auxiliar na redução das emissões de carbono, particularmente no setor de geração de energia e aquecimento de espaços (ZHANG *et al.*, 2022).

Song et al (2023) em sua pesquisa sobre um sistema de bomba de calor de expansão assistida direta por um equipamento de dupla condensação para a produção de energia secundária, ilustrada pela Figura 2.9. Este sistema utiliza um gerador termoelétrico (TEG - Thermoelectric generation) e tubos de calor micro canalizados (MCHP - Micro-Channel Heat Pipe) para transformar o calor residual em eletricidade e melhorar a produção geral de energia. O desempenho do sistema foi estudado e confirmado através de experimentos e modelagem matemática (Song et al., 2023).

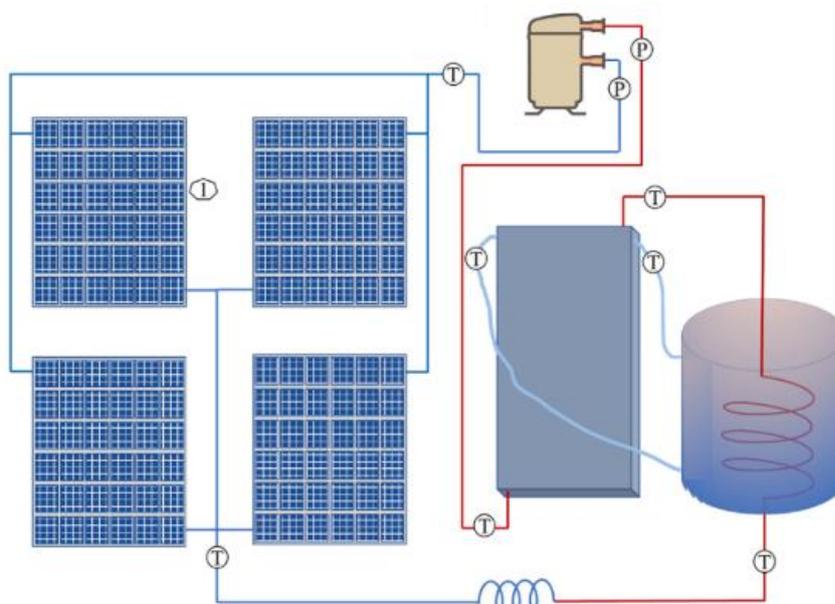


Figura 2.8 - Sistema PV-T de dupla condensação (SONG *et al.*, 2023).

A pesquisa aponta que o sistema sugerido possui uma eficiência elétrica superior quando descoberto com caldeiras a gás convencionais. Além disso, o sistema

demanda menos energia, tem custos operacionais mais baixos e diminui as emissões de carbono. Estima-se que o sistema pode economizar de 66,7% a 75% da energia, reduzir de 66,7% a 75% do custo de aquecimento e cortar de 50% a 66,7% das emissões de carbono (SONG *et al.*, 2023).

O estudo também avalia o desempenho do sistema em diferentes condições climáticas e latitudes. Os resultados indicam que o sistema apresenta melhor rendimento em regiões com alta incidência solar e temperaturas mais baixas. Além disso, uma análise exergética demonstra que o sistema possui maior eficiência exergética em temperaturas mais baixas (SONG *et al.*, 2023).

O trabalho realizado por Sezen e Gungor (2023) é uma revisão narrativa que aborda os sistemas de bomba de calor assistidos por energia solar (SAHP - Solar Assisted Heat Pump) em relação ao seu desempenho e estrutura. O estudo visa evitar a dificuldade de comparar os sistemas SAHP na literatura existente, oferecendo uma categorização básica desses baseados em seus métodos de uso final, projetos e configurações, conforme as Figura 2.10, Figura 2.11 e Figura 2.12. A eficácia dos sistemas é contrastada conforme as condições ambientais e os tipos de coletores solares em contato direto com o meio ambiente. Além do desempenho, a complexidade estrutural e o custo dos sistemas também são comparados. O estudo identifica áreas ainda não exploradas para desenvolvimento e novas perspectivas de projeto para pesquisas futuras.

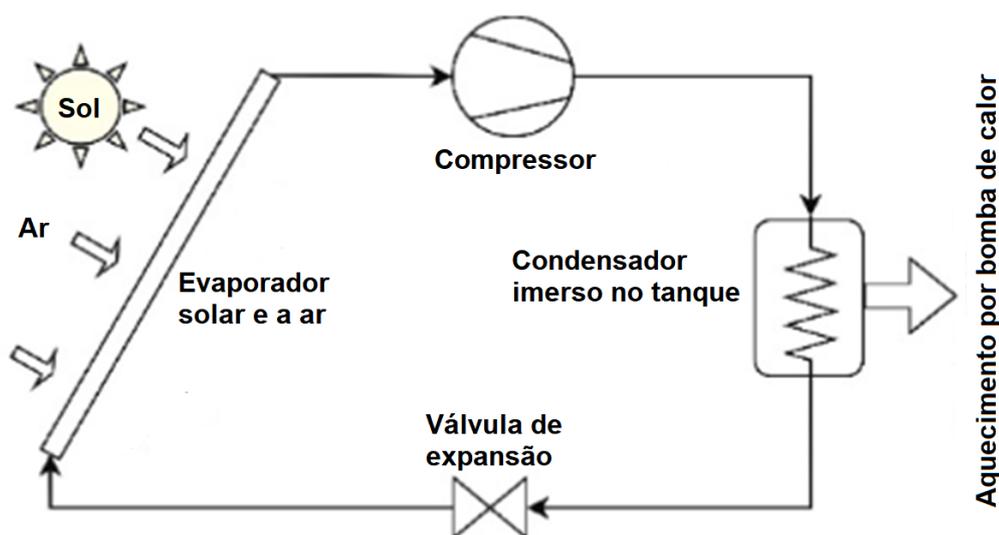


Figura 2.9 - Sistema PV-T expansão direta em serie (SEZEN; GUNGOR, 2023).

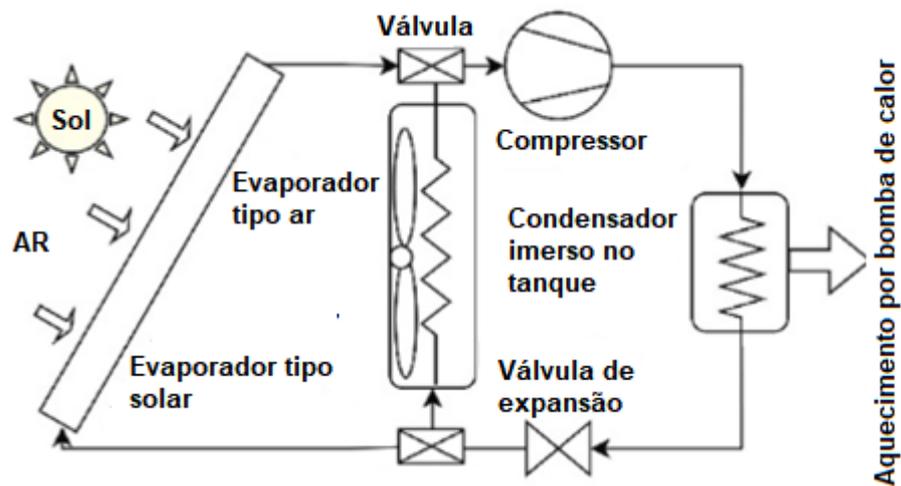


Figura 2.10 - Sistema PV-T expansão direta paralela (SEZEN; GUNGOR, 2023).

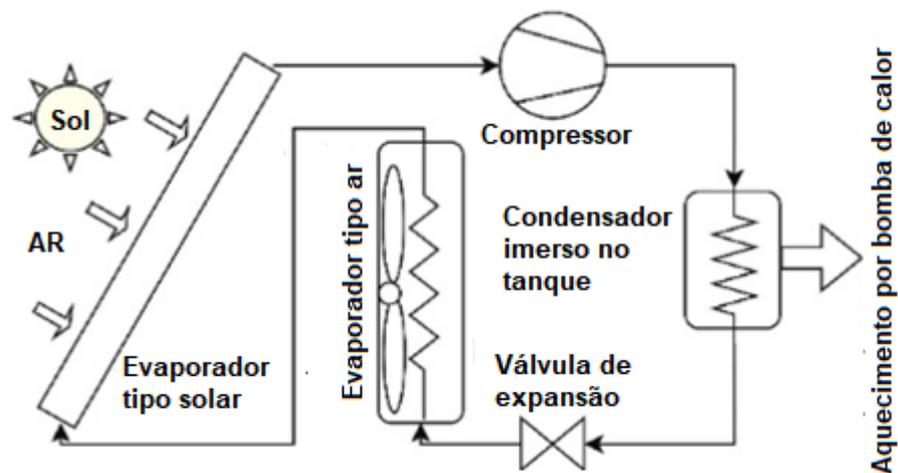


Figura 2.11 - Sistema PV-T expansão direta com fonte dupla (SEZEN; GUNGOR, 2023).

Além disso, o artigo faz referência a estudos anteriores que contemplaram a comparação de sistemas SAHP, enfatizando a dificuldade de comparar esses sistemas devido às diversas configurações, parâmetros e critérios de desempenho utilizados nas pesquisas. Os autores evidenciam a necessidade de uma definição amplamente aceita de técnica e desempenho, bem como indicadores de desempenho coerentes para facilitar a comparação de sistemas SAHP. Além disso, são citados estudos que avaliam a eficácia termodinâmica dos sistemas SAHP usando coletores PV-T e identificam refrigerantes de baixo impacto ambiental (SEZEN; GUNGOR, 2023).

O artigo realizado pelos pesquisadores AMMAR *et al.* (2013), examina um sistema híbrido de bomba de calor assistida por energia solar fotovoltaica (PV-T) destinado ao aquecimento de água, ilustrada na Figura 2.13. O sistema é composto por um coletor/evaporador PV-T, um compressor, uma válvula de expansão e um condensador resfriado por água. O objetivo do estudo é avaliar a eficácia do sistema através de análises termodinâmicas e modelos matemáticos.

O texto discute a eficiência térmica e total do evaporador PV-T, influenciada pela irradiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento e temperatura do céu. A eficiência térmica é mais elevada durante as manhãs e tardes devido à maior temperatura ambiente, enquanto a eficiência total diminui ao meio-dia devido ao aumento da temperatura da superfície do PV pela intensa irradiação solar (AMMAR *et al.*, 2013).

O estudo também destacou a importância do uso de um refrigerante (R134a) como fluido de resfriamento para potencializar o desempenho do sistema PV-T. Além disso, são fornecidos parâmetros de projeto e características técnicas do sistema PV-T, como o diâmetro interno e externo dos tubos, a área do absorvedor do evaporador, a temperatura inicial do refrigerante, entre outros (AMMAR *et al.*, 2013).

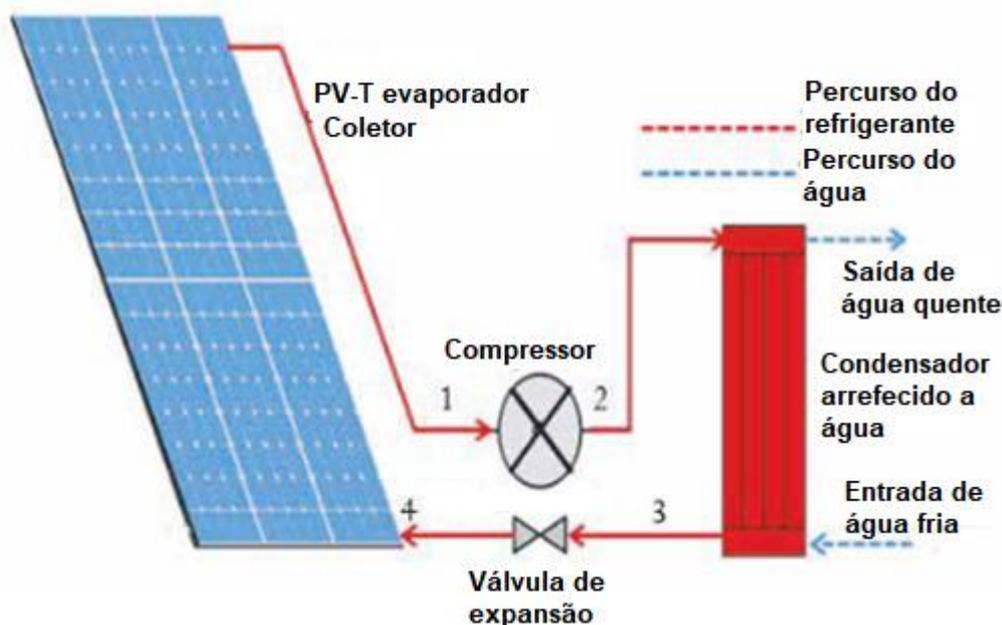


Figura 2.12 - Sistema PV-T para aquecimento de água (AMMAR *et al.*, 2013).

Os resultados demonstraram que o sistema PV-T tem uma eficiência total variando de 1,06 a 0,89 durante o período de simulação. A eficiência térmica é

impactada pela temperatura ambiente e irradiação solar, sendo mais elevada nas manhãs e tardes. A eficiência total é influenciada principalmente pela irradiação solar, apresentando valores mais baixos ao meio-dia (AMMAR *et al.*, 2013).

Em suma, o texto aborda a análise termodinâmica e o desempenho de um sistema híbrido de bomba de calor assistida por energia solar fotovoltaica para o aquecimento de água. Os resultados enfatizam a importância do uso de refrigerante como fluido de resfriamento e destacam a influência da irradiação solar e temperatura ambiente na eficiência do sistema PV-T (AMMAR *et al.*, 2013).

O estudo realizado por Valencia-Cañola *et al.*(2023), conforme ilustrado na Figura 2.14 uma análise de desempenho dinâmico de uma configuração proposta para um aquecedor de água solar fotovoltaico de expansão direta (PV-DX-SHPWH - Photovoltaic Direct-Expansion Solar Heat- Pump Water Heater) com capacidade de 110 L. O sistema foi avaliado usando um modelo dinâmico numérico validado sob condições meteorológicas típicas condições em Medellín, Colômbia. O fluido de trabalho escolhido foi o refrigerante R1234yf devido ao seu baixo potencial de aquecimento global e zero potencial de destruição do ozônio. O PV-DX-SHPWH incluiu um sistema de painel fotovoltaico como fonte principal de energia para um compressor de velocidade variável DC, com backup de energia fornecido pela rede elétrica.

O modelo numérico foi validado comparando os resultados da simulação com dados experimentais de um DX-SHPWH em escala de laboratório instalado em Quito, Equador. Os resultados mostraram boa concordância entre os dados numéricos e experimentais, com uma diferença máxima de temperatura de 2,7°C (VALENCIA-CAÑOLA *et al.*, 2023).

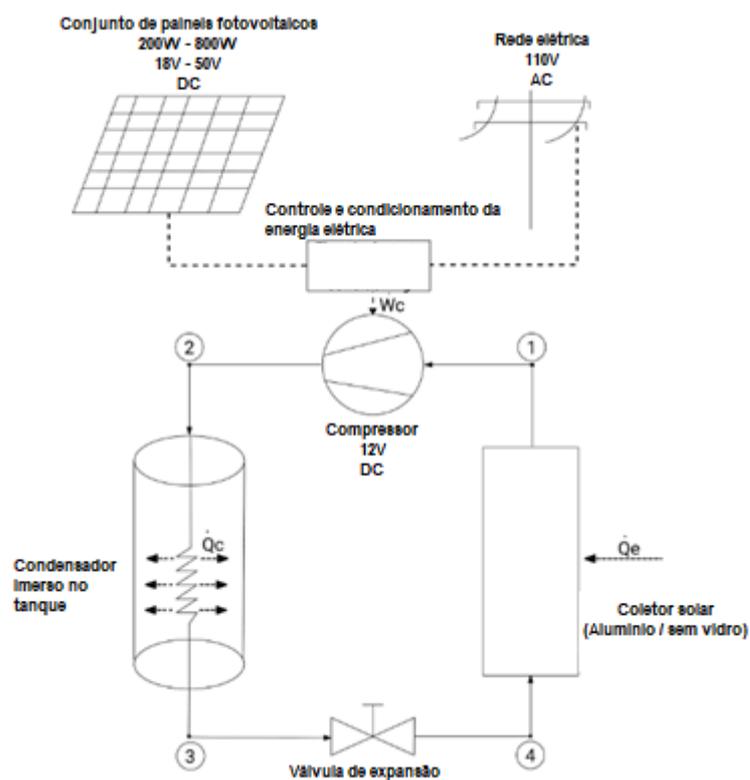


Figura 2.13 - Sistema de expansão direta para um tanque de 110L (VALENCIA-CAÑOLA *et al.*, 2023).

O desempenho térmico do PV-DX-SHPWH foi analisado para diferentes potências de pico fotovoltaicas instaladas variando de 200 W a 1000 W durante um ano meteorológico típico completo. O desempenho térmico médio foi estimado com base nessas simulações. A análise incluiu a evolução da temperatura da água e do coeficiente de desempenho (COP) durante três dias representativos (VALENCIA-CAÑOLA *et al.*, 2023).

Além disso, foi realizada uma análise econômica usando os resultados da simulação para todo o ano. O custo nivelado de energia (LCOE) foi calculado para comparar o aquecedor de água convencional com bomba de calor solar de expansão direta (PV-DX-SHPWH) com os sistemas tradicionais de aquecimento de água. O estudo constatou que o COP do sistema é maior em baixas potências fotovoltaicas instaladas. Uma faixa de potência fotovoltaica (200 W - 800 W) foi identificada onde o sistema alcançou alto desempenho (COP maior que 3,5) em um baixo LCOE. Dentro dessa faixa, o PV-DX-SHPWH foi considerado mais competitivo do que os aquecedores de água elétricos e a gás natural (VALENCIA-CAÑOLA *et al.*, 2023).

O artigo elaborado por Vaishak e Bhale (2021) aborda a análise de desempenho de um sistema fotovoltaico/térmico (PV-T) baseado em uma bomba de calor (SAHP - Solar Assisted Heat Pump). O objetivo do estudo é avaliar as características elétricas e térmicas do sistema PV-T-SAHP com um módulo PV de vidro duplo. O estudo inclui uma análise de primeira lei (análise energética) e uma análise de segunda lei (análise exergética) do sistema, conforme Figura 2.15.

A análise da primeira lei é realizada para avaliar o balanço de massa e energia do sistema. A análise de segunda lei, por sua vez, é realizada para avaliar a eficiência exergética do sistema. O estudo também inclui uma revisão da literatura sobre os sistemas PV-T e SAHPs, destacando estudos anteriores e suas compreensões (VAISHAK; BHALE, 2021).

Os resultados do estudo mostram que o sistema PV-T-SAHP apresenta um desempenho avançado em termos de produção de energia elétrica e térmica. A eficiência exergética do sistema é avaliada e verificada com outros sistemas de aquecimento de água. Conclui-se que o sistema PV-T-SAHP tem baixo custo operacional e baixa emissão de gases de efeito estufa em comparação com outros sistemas de aquecimento de água (VAISHAK; BHALE, 2021).

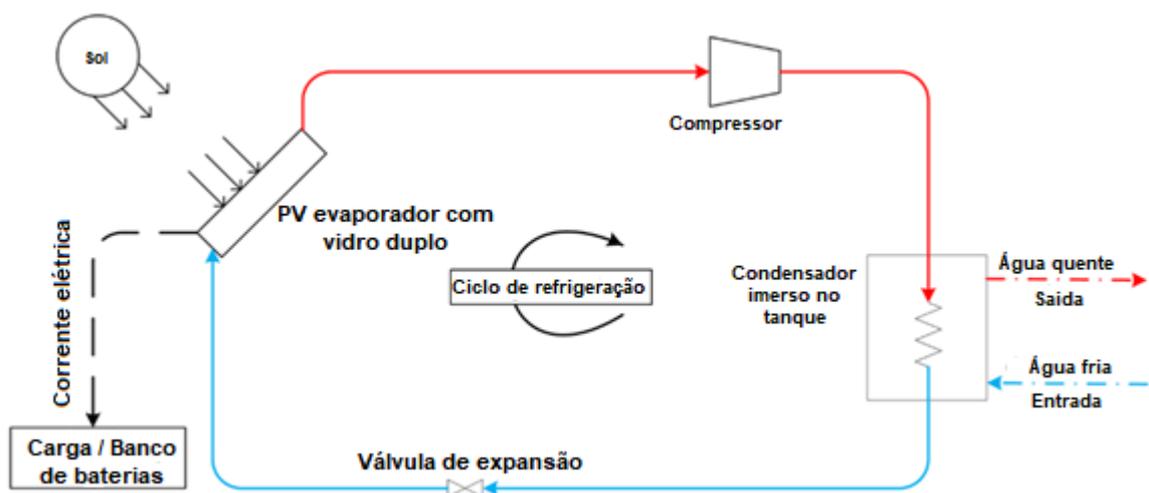


Figura 2.14 - Sistema PV-T expansão direta com duplo gás (VAISHAK; BHALE, 2021).

Além disso, o estudo também analisa o desempenho do sistema ao longo do ano, considerando diferentes condições climáticas. Os resultados mostram variações paralelas na produção de energia térmica e na eficiência do sistema, com maior produção de energia durante os meses de alta irradiação solar (VAISHAK; BHALE, 2021).

Os sistemas variam de simples a complexos, e, apesar da alta eficiência observada, ainda existem desafios a serem superados como melhorar a confiabilidade, reduzir custos e otimizar a integração dos componentes. A revisão sugere a necessidade de mais pesquisas, especialmente no desenvolvimento de novos materiais e tecnologias, para maximizar a eficiência e a sustentabilidade desses sistemas.

3 METODOLOGIA

É apresentado a descrição matemática dos componentes da Bomba de calor com painel PV-T. No caso de uma bomba de calor híbrida usando PV-T, a energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos é consumida pela bomba de calor. Simultaneamente, o calor absorvido pelo coletor térmico é usado para aumentar a eficiência da bomba de calor, conforme Figura 3.1.

Portanto, em um sistema híbrido PV-T e bomba de calor, a energia solar é utilizada tanto para gerar eletricidade quanto para coletar calor, que será utilizada para alimentar e aumentar a eficiência da bomba de calor. Este sistema apresenta várias vantagens, incluindo maior eficiência, sustentabilidade e potencial para reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis.

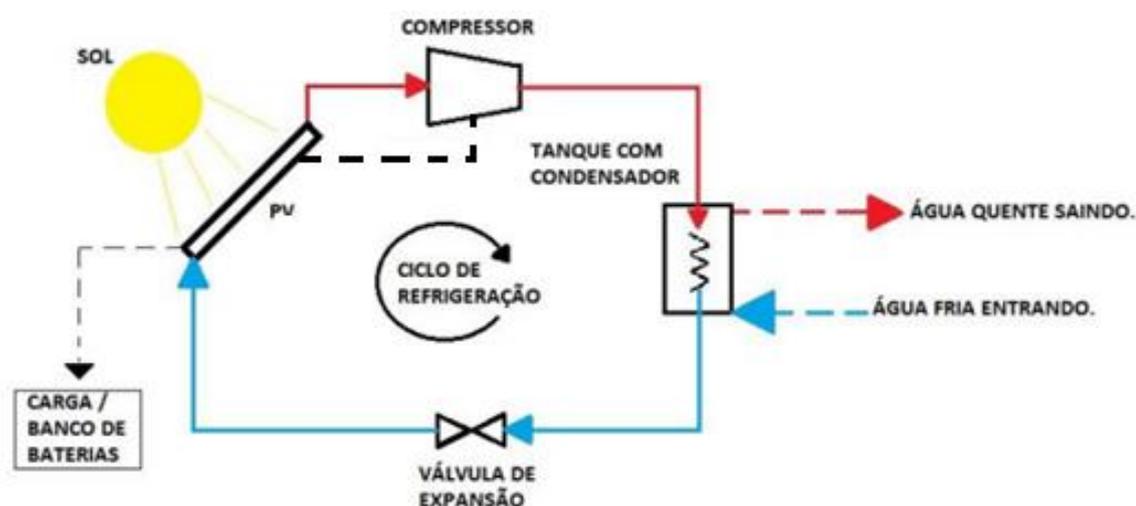


Figura 3.1- Sistema híbrido PV-T/BC para aquecimento de água com armazenamento de energia (Autor).

3.1 Dados solarimétricos

Para o desenvolvimento desta dissertação, serão empregados dados solarimétricos fornecidos pelo Instituto de Recursos Naturais (IRN). O IRN está equipado com um laboratório especializado, dotado de equipamentos de captação solar, que monitoram continuamente a irradiação solar – uma operação que ocorre 24 horas por dia, sete dias por semana. Os dados obtidos por essa instituição abrangem o período de janeiro de 2022 a dezembro de 2022.

3.2 Irradiação

Uma das maneiras de quantificar a irradiação solar é através da irradiância, é expressa na unidade de W/m^2 . A potência é uma grandeza física sendo definida como a energia transportada durante um certo intervalo de tempo, ou a taxa de variação da energia com o tempo, ou seja, nesse caso quanto maior a potência da irradiação solar, mais energia ela transporta em um determinado intervalo de tempo. Calcular a irradiância em W/m^2 é muito importante para avaliar a eficiência dos dispositivos e sistemas fotovoltaicos. A irradiância que entra na terra é de $I_o = 1367 W/m^2$ (DECEASED; BECKMAN, 2013).

Irradiância é prejudicada devido a composição da camada da atmosfera que é composta por água, dióxido de carbono e ozônio. Assim tende a ter uma diminuição na irradiância extraterrestre pois a concentração dessas substâncias na atmosfera é bem considerável. Por isso, a irradiância total sobre uma superfície horizontal é menor. Modelos permitem estimar as parcelas de irradiância direta ($I_{b,h}$) e difusa ($I_{d,h}$) sobre a superfície horizontal para o céu claro. A irradiação solar direta é a quantidade de energia solar que atinge diretamente uma determinada superfície, sem ser afetada ou desviada pela atmosfera terrestre. A irradiação solar difusa refere-se à energia solar que atinge a superfície da Terra depois de ser espalhada ou refletida pela atmosfera. Isso acontece quando a luz solar interage com moléculas de gás, partículas de poeira, gotas de água nas nuvens ou outras partículas presentes na atmosfera. Como resultado dessa interação, a luz solar é redirecionada em várias direções, incluindo para baixo, em direção à superfície da Terra, logo, através da Equação 1, pode-se calcular a irradiação total horizontal (DECEASED; BECKMAN, 2013).

$$I_{T,h} = I_{b,h} + I_{d,h} \quad (W/m^2) \quad (1)$$

O ângulo da irradiação solar direta, expressa pela Equação 2, é um fator crucial que determina a quantidade de energia solar que uma determinada superfície recebe. Este ângulo muda ao longo do dia e do ano devido à rotação da Terra e à sua órbita em torno do Sol. No período do dia, o ângulo da irradiação solar direta é mais vertical (ou seja, próximo a 90 graus em relação à superfície da Terra) ao meio-

dia, quando o Sol está no seu ponto mais alto no céu. Durante a manhã e à tarde, o ângulo se torna mais inclinado, o que significa que a mesma quantidade de energia solar é distribuída em uma área maior da superfície da Terra, resultando em menor intensidade de irradiação (DECEASED; BECKMAN, 2013).

A latitude de uma localização também afeta o ângulo da irradiação solar direta. Próximo ao equador, o sol está geralmente alto no céu, resultando em um ângulo de incidência mais vertical e maior intensidade de irradiação. Mais longe do equador, o ângulo de incidência torna-se mais inclinado, reduzindo a intensidade da irradiação solar (DECEASED; BECKMAN, 2013).

Além disso, o ângulo da irradiação solar direta varia ao longo do ano devido à inclinação do eixo de rotação da Terra. No solstício de verão, o Sol atinge seu ponto mais alto no céu, resultando em maior intensidade de irradiação. No solstício de inverno, o sol está mais baixo no céu, levando a uma menor intensidade de irradiação (DECEASED; BECKMAN, 2013).

Finalmente, é importante notar que o ângulo de incidência da irradiação solar direta tem implicações importantes para o projeto de sistemas de energia solar. Para maximizar a quantidade de energia solar captada, os painéis fotovoltaicos são frequentemente inclinados em um ângulo que corresponde à latitude do local (DECEASED; BECKMAN, 2013).

$$R_b = \frac{(\sin\delta * \sin * (\phi - \beta)) + (\cos\delta * \cos\omega * \cos * (\phi - \beta))}{(\sin\phi * \sin\delta) + (\cos\phi * \cos\delta * \cos\omega)} \quad (2)$$

Onde δ é o ângulo de declinação, ou seja, é o ângulo da posição do sol ao meio-dia solar, ϕ é a latitude da região estudada, β é o ângulo de inclinação o ângulo entre o plano da superfície do painel fotovoltaico e a horizontal e ω é o deslocamento angular do sol para leste ou oeste do meridiano local devido à rotação da Terra sobre o seu eixo a 15° por hora; manhã negativo, tarde positivo, também chamado de ângulo horário.

A irradiação solar difusa, dada pela Equação 3, ao contrário da irradiação solar direta, não vem de uma direção específica, mas é espalhada em todas as direções pela atmosfera da Terra. Como tal, o conceito de um "ângulo de irradiação" não se aplica da mesma maneira que para a irradiação solar direta (DECEASED; BECKMAN, 2013).

Quando a luz solar interage com partículas na atmosfera seja através de moléculas de gás, partículas de poeira, gotas de água em nuvens etc. ela é espalhada em várias direções. Isso significa que a irradiação difusa chega a uma superfície a partir de muitos ângulos diferentes, em vez de apenas um. Isso também significa que a irradiação difusa pode atingir áreas que estão na sombra ou que de outra forma não receberiam irradiação solar direta (DECEASED; BECKMAN, 2013).

A irradiação difusa é particularmente importante em dias nublados ou em áreas com alta poluição atmosférica, onde a quantidade de irradiação solar direta pode ser significativamente reduzida. Embora a intensidade da irradiação difusa seja geralmente menor do que a da irradiação direta, ela contribui significativamente para a irradiação solar total e, portanto, para a geração total de energia solar (DECEASED; BECKMAN, 2013).

$$R_d = \frac{1 - \cos\beta}{2} \quad (3)$$

A irradiação solar refletida é a porção da energia solar que é refletida de volta para a atmosfera depois de atingir uma superfície. O ângulo desta irradiação refletida é determinado por duas coisas: a natureza da superfície de reflexão e o ângulo de incidência da irradiação solar, conforme Equação 4 (DECEASED; BECKMAN, 2013).

A lei da reflexão estabelece que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Em outras palavras, se a irradiação solar atinge uma superfície em um ângulo de 30 graus em relação à normal (uma linha perpendicular à superfície), ela será refletida a um ângulo de 30 graus na direção oposta, conforme Figura 3.2 (DECEASED; BECKMAN, 2013).

$$R_b = \rho * \frac{1 - \cos\beta}{2} \quad (4)$$



Figura 3.2 - Irradiação direta, difusa e refletida respectivamente (DUFFIE; BECKMAN; MCGOWAN, 1985).

A irradiação efetiva sobre a placa coletora solar, ou irradiação total (I_T) é dada pela somatória das irradiâncias da superfície horizontal direta ($I_{b,h}$) e difusa ($I_{d,h}$), multiplicadas pelo ângulo da irradiação direta (R_b), ângulo da irradiação difusa (R_d), ângulo da irradiação refletida (R_r), conforme Equação 5 (DECEASED; BECKMAN, 2013).

$$I_T = (I_{b,h} * R_b) + (I_{d,h} * R_d) + (I_{b,h} + I_{d,h}) * R_r \quad (\text{W/m}^2) \quad (5)$$

3.3 Temperatura de trabalho do painel fotovoltaico convencional

A temperatura ambiente adotada pelos fabricantes é de 20°C para as condições NOTC – Temperatura normal de operação do painel fotovoltaico, esta condição é de laboratório, em uma câmara climatizada criada com um sistema de controle preciso e configurado para iluminação e temperatura. O NOCT de um painel fotovoltaico serve como um norte para estudar a temperatura na qual o módulo operará em campo, por isso é um parâmetro muito útil pois permite comparar o desempenho de diferentes modelos de painéis fotovoltaicos. Assim podemos calcular o coeficiente global de transferência de calor que é dado pela Equação 6:

$$\frac{UL}{\alpha\tau} = \frac{I_{T,NOCT}}{NOCT - T_{amb,NOCT}} \quad (6)$$

Como os fabricantes de placas fornecem os valores de irradiância, temperatura ambiente e a temperatura nominal de operação da placa, assim, obtém-se a relação de transferência de calor. A temperatura de operação da placa é de $NOCT$ é igual $45 \pm 2^\circ\text{C}$, ($I_{T,NOTC}$) irradiância de 800 W/m^2 e temperatura ambiente de 20°C .

Determinando o coeficiente global, consegue-se obter a temperatura de trabalho do painel (\bar{T}_{pv}), expressa pela Equação 7, ou seja, a temperatura que está sendo incidente no painel quando não existem um sistema de resfriamento ativo.

$$\bar{T}_{PV} = T_{amb} + \left(\frac{UL}{\alpha\tau} * I_T \right) \quad (^\circ\text{C}) \quad (7)$$

A variação da eficiência do painel fotovoltaico, em função da temperatura de trabalho do painel (\bar{T}_{pv}) usando as condições NOCT, conforme Equação 8:

$$\eta_{PV} = \eta_{NOCT} - 0,0035 * (\bar{T}_{PV} - \bar{T}_{PV,NOCT}) \quad (-) \quad (8)$$

3.4 Cálculo da Potência elétrica gerada.

A placa selecionada possui uma área total de A_{placa} é igual a 2,83 m², com esse dado obtém a eficiência do painel fotovoltaico (η_{PV}), a potência que ela irá gerar em dias ou em mês. Com isso a potência gerada, é dada através da Equação 9:

$$P_{ele} = I_T * \eta_{PV} * A_{placa} \quad (W) \quad (9)$$

Para a escolha do inversor, foi considerado que a tensão de circuito aberto (V_{oc}) não pode ultrapassar a tensão máxima permitida na entrada do inversor, além disso, considera um fator de correção de 10% para a tensão de circuito aberto e uma queda de tensão, essa queda é dada pelo coeficiente de temperatura de tensão de circuito aberto. Esses fatores servem para dar uma maior segurança ao dimensionamento do sistema.

3.5 Evaporador

O primeiro passo para o dimensionamento do evaporador é o cálculo do balanço de energia dado em Watts, no lado do painel fotovoltaico, conforme a Equação 10:

$$Q_{evap} = Q_{pv} - Q_{isolac\~{a}o} - Q_{ar} \quad (W) \quad (10)$$

onde Q_{air} , é o calor entre o painel fotovoltaico e o ar, expressa na Equação 11, e U_{air} é o coeficiente de transferência de calor do ar. Finalmente, a eficiência do painel fotovoltaico depende das condições de referência fornecidas pelo fabricante.

$$Q_{air} = U_{air} * A_{pV} * (T_{pv} - T_{air}) \quad (W) \quad (11)$$

Para calcular o calor do painel fotovoltaico (Q_{pv}), utiliza-se a Equação 12:

$$Q_{pv} = I_t * (1 - \eta_{pv}) * A_{pv} \quad (W) \quad (12)$$

Onde, I_t é a irradiação total, η_{pv} é o rendimento do painel fotovoltaico e A_{pv} é a área do painel. Para calcular a perda de calor por isolamento, pode considerar a Equação 13.

$$Q_{isolação} = U_{isol} * A_{evap} * (T_{air} - T_{evap}) \quad (W) \quad (13)$$

A quantidade de calor que o evaporador irá receber, é calculada através da Equação 14:

$$Q_{evap} = U_{evap} * A_{evap} * (T_{pv} - T_{evap}) \quad (W) \quad (14)$$

O cálculo da transferência média de calor, é expressa pela Equação 15:

$$U_{evap} = \frac{1}{\left(\frac{1}{HT_{ref}}\right) + \left(\frac{1}{C_b}\right)} \quad (W/m^2K) \quad (15)$$

Onde T_{air} são as temperaturas do painel fotovoltaico, fornecida pelo IRN – Instituto de Recursos Naturais. U_{evap} é o coeficiente médio de transferência de calor. HT_{ref} para fluido refrigerante do evaporador e considerando o fator de resistência de contato C_b . Para o escoamento bifásico é usada a correlação de Shah (2017) que é válida para micro, mini e macro- canais. Para o escoamento monofásico é usada a correlação de Prabhanjan, Rennie e Raghavan (2004).

Para calcular o calor no evaporador no lado do fluido refrigerante, que para essa dissertação foi utilizado o fluido R134a. conforme a Equação 16.

$$Q_{evap} = m_{ref} * (h_{sai_{evap}} - h_{ent_{evap}}) \quad (W) \quad (16)$$

3.6 Compressor

A vazão mássica também desempenha um papel importante na distribuição adequada do refrigerante dentro do sistema. Um fluxo de refrigerante inadequado pode resultar em desequilíbrio na transferência de calor e diminuição da eficiência do sistema. Ao calcular a vazão mássica correta, pode-se garantir que o refrigerante seja distribuído de maneira uniforme e eficiente, garantindo um desempenho adequado do sistema e evitando problemas como superaquecimento ou sub-resfriamento em diferentes pontos do sistema, conforme Equação 17.

$$m_{ref} = \eta_{vd} * \rho_{suc} * V_d \quad (\text{kg/s}) \quad (17)$$

Utilizando a Equação 18, pode se obter a eficiência volumétrica.

$$\eta_{vd} = a + b(RC) \quad (-) \quad (18)$$

Onde ρ e V_d são respectivamente, os valores de densidade e o volume de deslocamento, RC é a relação de compressão, e a, b e c são constantes fornecidas pelo fabricante.

Determinar o rendimento isentrópico do compressor é importante para avaliar o desempenho efetivo do equipamento e compará-lo com o rendimento ideal. O rendimento isentrópico é uma medida da eficiência com que o compressor realiza o trabalho, levando em consideração as perdas de energia durante o processo. Utilizando a Equação 19, pode se obter a eficiência isentrópica.

$$\eta_{isen} = a(RC)^2 + b(RC) + c \quad (-) \quad (19)$$

O trabalho isentrópico de um compressor ($W_{c_{isen}}$) é a quantidade de trabalho necessário para comprimir um gás de forma adiabática e reversível, ou seja, sem perdas de calor para o ambiente externo. Através da Equação 19 consegue obter o trabalho isentrópico do compressor.

$$W_{c_{isen}} = m_{ref} * (h_{isen,saida-comp} - h_{entrada-comp}) \quad (\text{W}) \quad (20)$$

A Equação 21, calcula o trabalho real do compressor.

$$W_{creal} = \frac{W_{cisen}}{\eta_{vol}} \quad (W) \quad (21)$$

3.7 Condensador

Para o dimensionamento do condensador é necessário o cálculo do balanço de energia conforme a Equação 22:

$$Q_{\acute{a}gua} = Q_{cond} - Q_{isol_{tanque}} \quad (W) \quad (22)$$

Para calcular o calor da isolação do tanque ($Q_{isol_{tanque}}$), utiliza-se a Equação 23:

$$Q_{isol_{tanque}} = U_{isol_{tanque}} * A_{tanque} * (T_{\acute{a}gua} - T_{air}) \quad (W) \quad (23)$$

Onde $U_{isol_{tanque}}$ e A_{tanque} , são a perda de calor das paredes do tanque por condução e a área superficial do tanque, respectivamente. O calor da água é calculado através da Equação 24.

$$Q_{\acute{a}gua} = m_{\acute{a}gua} * cp_{\acute{a}gua} * \left(\frac{T_{Final_{\acute{a}gua}} - T_{inicial_{\acute{a}gua}}}{\Delta t} \right) \quad (W) \quad (24)$$

Onde $Q_{\acute{a}gua}$, $m_{\acute{a}gua}$, $cp_{\acute{a}gua}$, $T_{final_{\acute{a}gua}}$, $T_{inicial_{\acute{a}gua}}$ e Δt , são o calor da água, a massa de água no tanque, o calor específico da água, a temperatura da água, a temperatura inicial da água e a variação de tempo, respectivamente.

O calor no condensador no lado do fluido refrigerante. Utiliza a Equação 25.

$$Q_{cond} = m_{ref} * (h_{ent_{cond}} - h_{sai_{cond}}) \quad (W) \quad (25)$$

Assim, a entalpia na saída pode ser calculada efetivamente ao empregar a Equação 26.

$$h_{sai_{cond}} = h_{ent_{cond}} - \left(\frac{Q_{cond}}{m_{ref}} \right) \quad (kJ/kg) \quad (26)$$

A quantidade de calor no condensador, é expressa pela Equação 27.

$$Q_{cond} = U_{cond} * A_{evap} * (T_{cond} - T_{agua}) \quad (W) \quad (27)$$

onde Q_{cond} , U_{cond} , A_{cond} , T_{cond} são o calor do condensador, o coeficiente de transferência de calor do condensador, a área superficial da bobina, e temperatura do condensador, respectivamente, Equação 28.

$$A_{cond} = L_{serp} * D_{cond} * \pi \quad (m^2) \quad (28)$$

HT_{ref} para o escoamento bifásico é usada a usada correlação de Shah (2016), expressa na Equação 29, que é válida para micro, mini e macro-canais. Para o escoamento monofásico é usada a Prabhanjan, Rennie e Raghavan (2004). Para ajudar no desenvolvimento do sistema, alguns valores foram calculados através do coolprop.

$$U_{cond} = \frac{1}{\left(\frac{1}{HT_{ref}}\right) + \left(\frac{1}{HT_{agua}}\right)} \quad (W/m^2K) \quad (29)$$

3.8 Modelamento do sistema PV-T e bomba de calor

Na Figura 3.3 é mostrado como funciona o modelo do sistema híbrido, na Figura 3.4 mostra a sequência como o modelo é resolvido. A simulação será feita em intervalos de tempos de uma hora, e além dos parâmetros geométricos de todos os componentes, também tem como entrada três variáveis: irradiação solar incidente no painel (I_T), Temperatura ambiente (T_{amb}) e temperatura inicial do tanque ($T_{tanque,i}$) que mudam a cada hora. Para encontrar os parâmetros energéticos do sistema e resolver as equações de cada componente, é preciso calcular as temperatura do painel fotovoltaico, do evapora, do compressor e final do tanque, de forma simultânea, criando assim um sistema de equações não-lineares com 4 incógnitas. A solução desse sistema de equação 9-29 foi feita usando ferramenta "SOLVE" de Matlab.

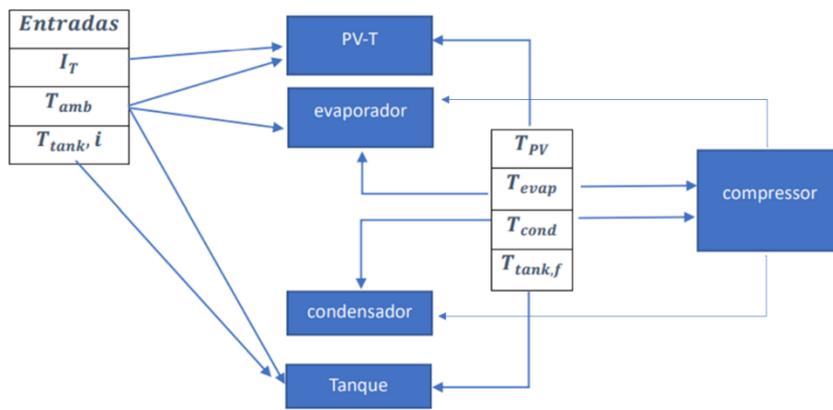


Figura 3.3 – Diagrama de blocos do PV-T com BC.

3.9 Fluxograma

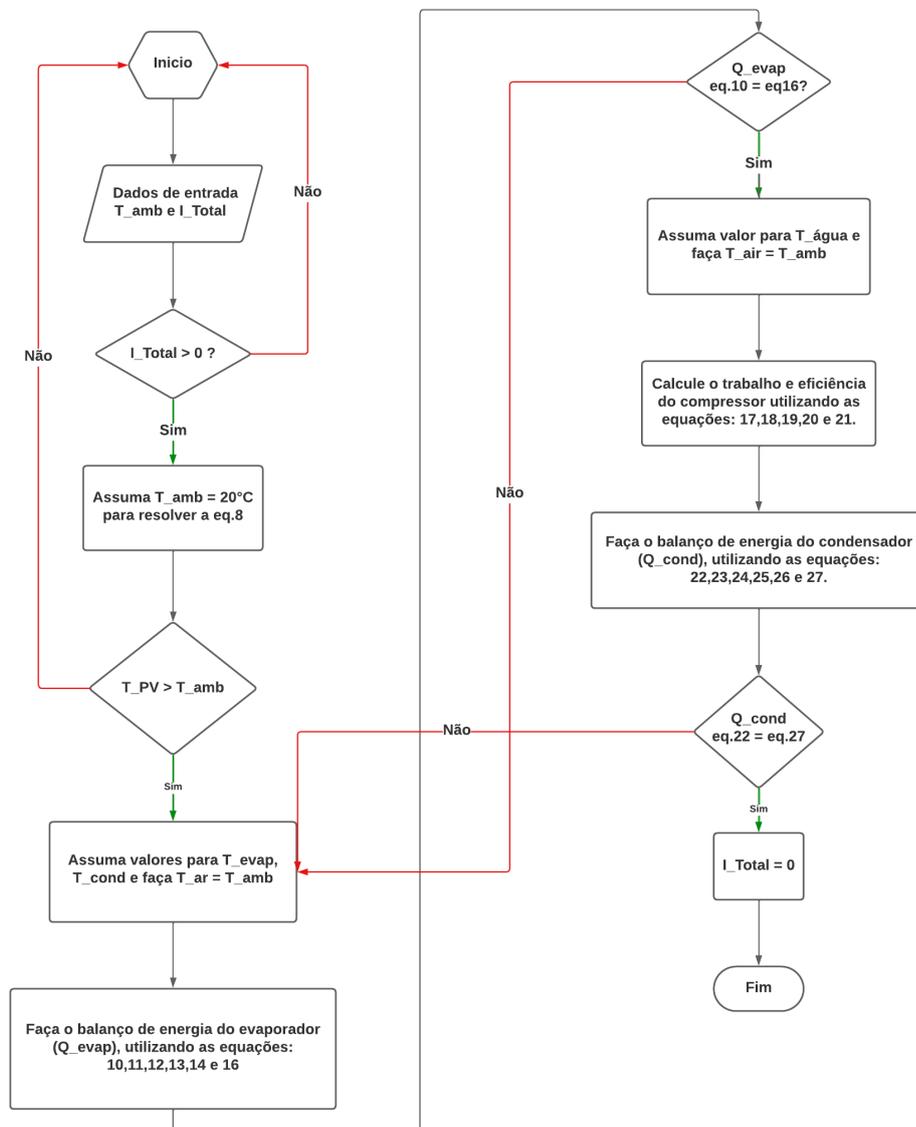


Figura 3.4 - Fluxograma.

3.10 AQS

Um aquecedor solar a vácuo é um tipo de sistema de aquecimento solar de água que utiliza tubos de vidro a vácuo para captar e reter o calor do sol. Estes sistemas são uma maneira altamente eficaz e sustentável de fornecer água quente para uso residencial ou comercial, utilizando a energia renovável do sol. Os tubos de vidro a vácuo são a parte principal do sistema de aquecimento. Eles consistem em dois tubos de vidro concêntricos, entre os quais é criada uma embalagem. As embalagens servem como um excelente isolante térmico, ajudando a evitar a perda de calor para o ambiente. O tubo interior é revestido com um material especial que absorve a energia solar e converte em calor.

Para determinar a potência útil fornecida pelos coletores solares, leva em consideração a eficiência térmica dos coletores, a área dos coletores e a irradiação solar incidente, conforme Equação 30 e a Equação 31 determina a quantidade de calor no água armazenada no tanque.

$$P_{coletor} = A_c * \eta_c * I_T \quad (W) \quad (30)$$

$$Q_{\acute{a}gua} = P_{coletor} - Q_{isol_{tanque}} \quad (W) \quad (31)$$

Onde $Q_{\acute{a}gua}$ é a quantidade de energia absorvida pela água em um determinado tempo e $Q_{isol_{tanque}}$ é a perda de energia entre o interior do tanque e seu exterior calculada com Equação 31.

3.11 Chuveiro elétrico

Utilizando a Equação 32 pode calcular o valor da energia consumida, durante o mês.

$$E_{chuveiro} = \frac{P_{chuveiro} * t_{uso} * diadom\acute{e}s}{1000} \quad (kWh) \quad (32)$$

Onde $P_{chuveiro}$ é a potência do chuveiro na residência em watts, que foi considerada de 5500 W, t_{uso} é o tempo de utilização do chuveiro em horas, igual a 10 minutos por pessoa, e $diadosmês$ é o número de dias dentro de um mês.

3.12 Parâmetro de viabilidade econômica

Para avaliar a viabilidade econômica de um sistema PV-T com bomba de calor, será considerado 6 parâmetros:

- **Custo Inicial De Instalação (CAPEX):** Este é o custo associado à compra e instalação do sistema PV-T. Inclui o custo dos módulos fotovoltaicos e térmicos, inversores, baterias, custos de mão de obra, entre outros, conforme Equação 33.

$$CAPEX = \sum PV + Inversor + Bateria + BC + Reservatório + Mão de Obra + Outros \quad (33)$$

- **Custo De Operação E Manutenção (OPEX):** Estes são os custos contínuos associados à operação e manutenção (OPEX) do sistema PV-T, incluindo reparos, substituições e inspeções regulares. O tempo de manutenção é considerado bom de ano em ano, já o de operação deve-se analisar o período de vida útil da placa fotovoltaica, dada pela Equação 34.

$$OPEX = \sum \text{Custo de manutenção} + \text{Custo de operação} \quad (34)$$

- **Custo Nivelado Da Energia (LCOE):** O LCOE (Levelized Cost of Electricity) é uma métrica usada para avaliar o custo médio de produção de eletricidade ao longo da vida útil de um sistema. Quando se trata de um sistema híbrido fotovoltaico-térmico (PV-T), o LCOE leva em consideração tanto os custos associados à geração de eletricidade a partir do painel fotovoltaico, quanto os custos associados à geração de energia térmica. Para

determinar o LCOE de um sistema híbrido PV-T, é necessário estimar os custos e a produção de energia ao longo do tempo, conforme a Equação 35. Isso pode ser feito considerando-se a capacidade de geração elétrica do sistema fotovoltaico e a capacidade de geração térmica do condensador, bem como a eficiência de conversão energética de ambos os componentes.

$$LCOE = \frac{CAPEX + OPEX}{GERAÇÃO AO LONGO DO TEMPO} \quad (35)$$

É importante notar que a viabilidade econômica de um sistema PV-T pode variar significativamente dependendo das condições locais, como a irradiação solar, os preços da energia e os incentivos governamentais disponíveis.

3.13 Parâmetros iniciais do projeto

Será atotado alguns considerações iniciais para o projeto, analisando variáveis e parâmetros que afetam o seu desempenho. O objetivo é projetar um sistema altamente eficiente e economicamente viável.

A primeira etapa da nossa pesquisa envolve a seleção do painel fotovoltaico. Este é um dos componentes mais importante do sistema, uma vez que ele é responsável pela conversão da luz solar em eletricidade. A eficiência e a confiabilidade do painel determinarão em grande medida o desempenho geral do sistema. Além disso, será acoplado o evaporador que ajuda a absorver o excesso de calor dos painéis fotovoltaicos. As células fotovoltaicas tendem a se aquecer durante a operação, o que pode, na verdade, reduzir sua eficiência.

Ao acoplar um evaporador ao sistema, o calor excessivo é transferido para um fluido de trabalho, convertendo-o em vapor. Isso não apenas ajuda a resfriar os painéis, efetivamente sua eficiência, mas também captura o calor para aplicações térmicas, conforme Figura 3.4, observa o calor entrando na placa (Q_{pv}), e as perdas por convecção pelo isolamento ($Q_{isolamento}$) e a perda pelo ar (Q_{ar}), os pontos em amarelo representa o evaporador, o calor recebido pelo evaporador é realizado por meio do balanço de energia entre a diferença das perdas de calor .

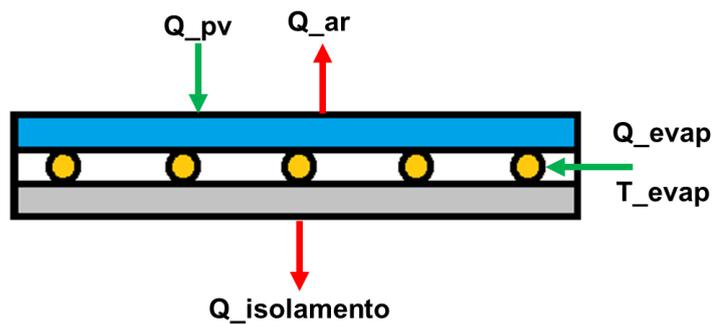


Figura 3.5 - Evaporador acoplado ao painel fotovoltaico.

Quando integrado com uma bomba de calor, o vapor gerado no evaporador é então comprimido, aumentando sua temperatura. Esse calor é posteriormente utilizado para aquecimento ou outras aplicações térmicas, conforme Figura 3.5.

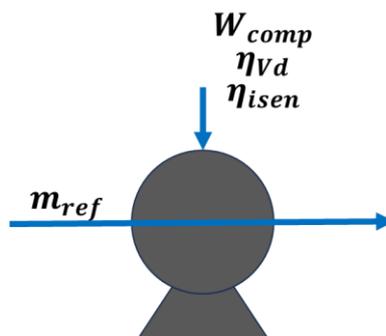


Figura 3.6 - Compressor.

Através da vazão mássica do fluido refrigerante (m_{ref}), consegue calcular as eficiências volumétrica (η_{Vd}) e isentrópica (η_{isen}), e o trabalho do compressor (W_{comp}), com isso é possível dimensionar o tamanho do compressor a ser utilizado no sistema PV-T com bomba de calor.

Ao projetar um sistema PV-T com um condensador imerso em um tanque, é importante levar em consideração a capacidade do tanque e a eficiência do condensador. O material do condensador, a área de superfície para a transferência de calor e a configuração geral do sistema também são considerações importantes, conforme mostrado na Figura 3.6.

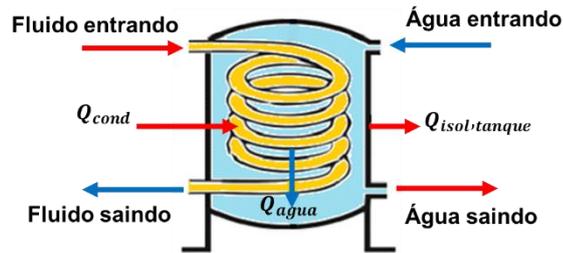


Figura 3.7 - Desenho de um compressor imerso em um tanque com água.

Na Figura 3.6, é mostrado a perda de calor por isolamento ($Q_{isolamento}$) e a quantidade de calor que entra no condensador, assim consegue fazer o balanço de energia, obtendo a quantidade de energia que é transferida para a água (Q_{agua}).

Esse sistema é analisado para um período de 365 dias, e é considerado apenas 12 horas do dia, também é considerado água armazenada no tanque só será utilizada a partir das às 18 horas, e até às 5 horas da manhã do outro dia o tanque estará totalmente vazio, a partir das 6 horas ele começa a encher o tanque novamente, assim, é considerado que a temperatura inicial do tanque seja a mesma do início do dia. Para isso realizar os cálculos para cada hora do dia dos 365 dias, foi desenvolvido do “Zero”, um código na ferramenta Matlab.

4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Neste capítulo, realizado o dimensionamento e a escolha de equipamentos para um sistema fotovoltaico térmico (PV-T) com bomba de calor. O projeto envolve determinar a capacidade dos painéis fotovoltaicos necessária para suprir a demanda elétrica, assim como selecionar uma bomba de calor adequada para o aquecimento de água. A eficiência dos painéis, a irradiação solar disponível, a demanda energética e o desempenho da bomba de calor são considerados nesse processo. Além disso, a integração adequada dos componentes de controle e a compatibilidade com as condições ambientais também são levadas em conta. A escolha criteriosa dos equipamentos resulta em um sistema PV-T eficiente, que utiliza a energia solar para a geração de eletricidade e água quente, proporcionando economia de custos e benefícios ambientais.

4.1 Seleção do painel fotovoltaico

Para esse projeto foi considerado um único painel fotovoltaico da Luxen Solar de 595 Wp, conforme Figura 4.1. É uma placa do tipo policristalina, que é dividida ao meio, isso faz com que se a placa sofrer interferência de sujeira, sobra etc., em ambas as partes, ela ainda é capaz de produzir 50% de sua energia. A placa possui um comprimento de 2,172 m e uma largura de 1,303 m, totalizando uma área de 2,83 m.

4.2 Inversor senoidal pura e Controlador de carga

A função do inversor solar de onda senoidal pura é converter a energia elétrica de corrente contínua (CC), produzida pelos painéis fotovoltaicos, em energia elétrica de corrente alternada (CA) com forma de onda senoidal pura. Esse tipo de inversor é projetado para fornecer uma qualidade de energia semelhante a encontrada na rede elétrica convencional. Isso possibilita o uso de dispositivos de corrente alternada sensíveis, garante uma energia de alta qualidade e protege os equipamentos conectados.

O controlador de carga, também conhecido como regulador de carga ou controlador de carga solar, é um dispositivo eletrônico utilizado em sistemas de energia solar fotovoltaica para regular o fluxo de energia entre os painel fotovoltaico e as baterias. Sua função principal é proteger as baterias contra sobrecarga, descarga excessiva e outras condições prejudiciais, além de otimizar a eficiência do sistema.

4.3 Dimensionamento do tanque

A norma técnica brasileira ABNT NBR 15569:2008 prescreve os parâmetros para reservatórios térmicos de sistemas de aquecimento solar de água. A referida norma proporciona diretrizes especificadas para o design, construção e instalação de tais reservatórios térmicos, assegurando a segurança e otimização de sistemas de aquecimento solar.

Em uma configuração de sistema fotovoltaico-térmico (PV-T), o reservatório térmico possui um papel crucial no armazenamento da energia calorífica. Este reservatório é incumbido de preservar a água aquecida gerada pelo sistema para uso subsequente, possibilitando que a energia térmica seja empregada mesmo em períodos em que a demanda imediata por água aquecida é mínima.

A quantificação do reservatório térmico, segundo a ABNT NBR 15569:2008, é executada utilizando a equações 36:

$$V_{consumo} = \sum(V_{uso} * t_{uso} * \text{frequência de uso}) \text{ (Litros/dia)} \quad (36)$$

O parâmetro V_{uso} representa a vazão de uso de água (L/min), enquanto t_{uso} indica o tempo de uso diário (min) e a frequência de uso demonstra as vezes que o sistema é empregado por dia. Ao aplicar as informações contidas na norma técnica ABNT NBR 15569:2008, especificamente referente aos dados na tabela 4.1, e levando em consideração a média residencial de três habitantes, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é possível calcular o volume total de consumo.

Tabela 4.1- Consumo de pontos de água quente.

Peça	Consumo mínimo	Consumo máximo	Ciclo diário (minutos/pessoa)	Temperatura de consumo °C
Ducha de banho	3,0 L/min	15,0 L/min	10	39 - 40
Lavatório	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39 - 40
Ducha higiênica	3,0 L/min	4,8 L/min	3	40 - 40
Banheira	80 L	440 L	banho	39 - 40
Pia de cozinha	2,4 L/min	7,2 L/min	3	39 - 40
Lava - louça (12 pessoas)	20 L	20 L	Ciclo de lavagem	39 - 50
Máquina de lavar roupa	90 L	200 L	Ciclo de lavagem	39 - 40

Fonte:(ABNT NBR15569:2008).

Levando em conta que a duração de um banho por indivíduo é de 10 minutos, que a taxa de fluxo média corresponde a 9 L/min e que a frequência diária de banho seja de duas vezes por dia, é possível calcular um determinado volume de consumo.

$$V_{consumo} = 9 * 10 * 1 * 3 = 270 \text{ (L/dia)}$$

O parâmetro $T_{consumo}$ representa a temperatura de consumo, que de acordo com a norma técnica em questão, deve ser considerada como 40°C. A temperatura ambiente, por sua vez, corresponde à média anual das temperaturas no local de instalação do sistema. Adicionalmente, a temperatura de armazenamento precisa ser igual ou superior à temperatura de consumo. Para os propósitos deste estudo, os valores assumidos para $T_{armazenamento}$ e $T_{ambiente}$ foram, respectivamente, 45°C e 20°C, conforme a Equação 37.

$$V_{armazenamento} = \frac{V_{consumo} * (T_{consumo} - T_{ambiente})}{(T_{armazenamento} - T_{ambiente})} \quad (37)$$

Assim o volume de armazenamento térmico, deve ser de:

$$V_{armazenamento} = \frac{270 * (40 - 20)}{(45 - 20)} = 216 \text{ L/dia}$$

4.4 Dimensionamento do compressor

Por meio da manipulação das equações 6 e 12, determinou-se que a energia térmica do painel pode ser calculada conforme a Equação 39. Dado que a potência nominal do painel é de 595Wp esperasse que o painel trabalhe a uma temperatura de 30°C (menor que a temperatura NOTC) com eficiência de 0,21 a uma irradiação de 800W/m², o calor gerado pelo painel é de 1788 W, conforme Equação 38.

$$Q_{pv} = I_T * A_{pv} * (1 - \eta_{pv}) = 800 * 2,83 * (1 - 0,21) = 1788 \text{ (W)} \quad (38)$$

A metodologia empregada para dimensionar o compressor baseou-se inicialmente no cálculo da vazão mássica do refrigerante, uma vez que a referida vazão está intrinsecamente relacionada com a performance e eficiência energética do sistema. É imperativo que o compressor seja adequado de forma a garantir uma vazão propícia para suprir as exigências de condução ou aquecimento do sistema. Um déficit em vazão mássica pode resultar na incapacidade do sistema em prover a capacidade desejada, culminando em performance insatisfatória. Em contrapartida, uma superabundância na vazão mássica pode ocasionar um consumo energético desnecessário, uma vez que o compressor operaria em um intervalo de carga excessivamente elevado.

Com o emprego do software Coolpack, conforme tabela 4.2, e definindo as temperaturas selecionadas para o ciclo da bomba de calor. As temperaturas de condensação e evaporação foram consideradas como 25°C e 55°C, além de um rendimento volumétrico (η_v) de 0,8 e um eficiência isentrópica (η_{isen}) igual à 0,5. Será considerado que só 80% do calor gerado, será absorvida pelo fluido refrigerante, o restante será perdido para o ambiente.

Tabela 4.2 - Dados extraídos do software Coolpack.

Temperatura de evaporação (°C)	Temperatura de condensação (°C)	Temperatura de superaquecimento (°K)	Temperatura de subresfriamento (°K)	η_{vol}
25	55	5	5	0,9
Qevap [kJ/kg]	Qcond [kJ/kg]	COP	W [kJ/kg]	Relação de pressão
144,814	178,724	4,27	33,91	2,241

A Figura 4.1, representa o ciclo de refrigeração do sistema em estudo, foi gerado de acordo com os dados da Tabela 4.2. O fluido utilizado é o R134a, pois tem um bom potencial de condução, o que significa que pode mover uma grande quantidade de calor de um lugar para outro, tornando-o eficaz em sistemas de bombas de calor, é quimicamente estável, o que significa que não irá se decompor ou reagir com outros materiais sob condições normais de operação, além disso, é compatível com muitos materiais comuns usados em sistemas de bombas de calor, o que significa que é menos provável que cause corrosão ou outros problemas, e por fim possui um baixo custo comercial.

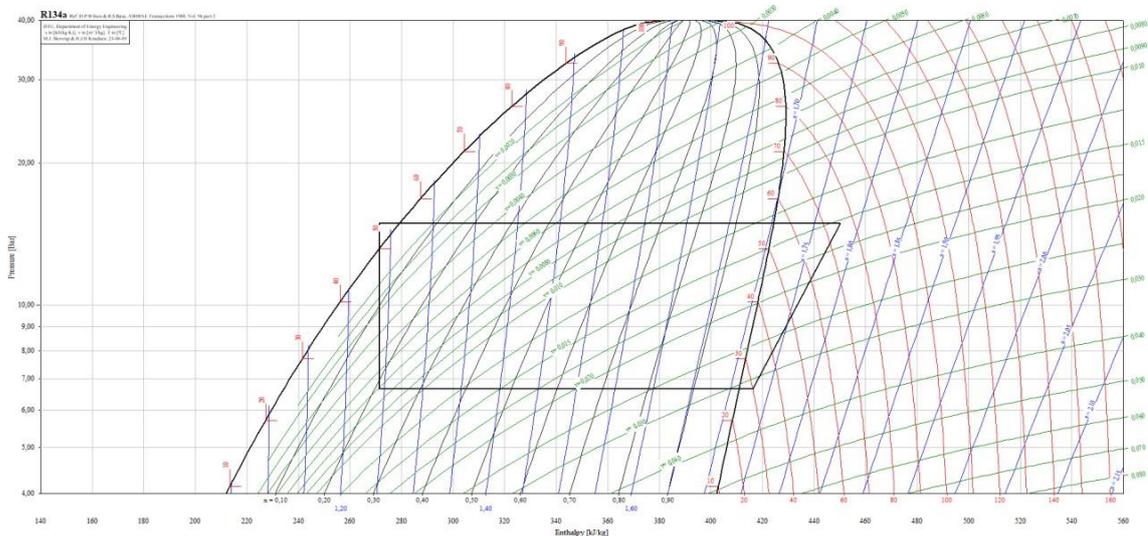


Figura 4.1 - Ciclo de refrigeração do fluido.

Utilizando a Equação 39, calcula-se a vazão mássica do fluido refrigerante.

$$\dot{m}_f = \frac{Q_{evap}}{\Delta h_{evap}} = \frac{1788 * 0,8}{144,8} = 0,009 \quad (\text{kg/s}) \quad (39)$$

Utilizando a Equação 40, calcula-se o deslocamento volumétrico.

$$V_d = \frac{m_{ref} * \rho_{suc}}{\eta_{vol}} = \frac{0,009 * 0,031684}{0,8} = 3,56 * 10^{-4} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (40)$$

Uma vez obtido o deslocamento volumétrico, é possível calcular o volume do cilindro do compressor ao dividir pelo número de rotações por segundo, conforme estabelecido pela Equação 41.

$$V_{cilcomp} = \frac{V_d}{N_{rot}} = \frac{3,56 \times 10^{-4}}{60} = 5,94 \times 10^{-6} \quad (\text{m}^3) \quad (41)$$

Comercialmente foi selecionado um compressor de tamanhos 5,5 cm³ da Embraco Nidec, conforme Figura 4.2. O compressor opera com o fluido R134a.



Figura 4.2- Imagem do compressor.

4.5 Dimensionamento do evaporador

O dimensionamento do evaporador em um sistema Fotovoltaico- Térmico (PV-T) é uma tarefa que envolve a consideração de múltiplas variáveis, incluindo a potência térmica necessária, a temperatura de operação, a área disponível e as propriedades do fluido de trabalho. Para a elaboração do projeto, foi adotado um tubo de 12,7 mm de cobre um diâmetro interno (D_{evap}) igual a 11 mm, o U_{evap} igual 518W/m²K estimado como o coeficiente de transferência de calor médio para o fluido R134a em evaporação em 1380W/m²K usando a correlação Shah (2017) e um coeficiente de contato de $C_b = 828 \text{ W/m}^2\text{K}$. A diferença de temperatura entre o painel e o evaporador de 5°C, permitindo assim a determinação do comprimento da serpentina do evaporador, tal como definido pela Equação 43.

$$L_{serp} = \frac{Q_{evap}}{U_{evap} \cdot \Delta T \cdot \pi \cdot D_{evap}} = \frac{1788}{518 \cdot 5 \cdot \pi \cdot 0,011} \cong 20 \quad (\text{metros}) \quad (43)$$

A placa aqui dimensionada possui uma área igual a 2,83 m², o evaporador tem 20 metros, Para poder saber a quantidade de curvas serão necessárias para poder construir a serpentina do evaporador, utiliza a Equação geral 46. Onde a largura da placa (L_{PV}) é de 1,303 metros e comprimento (H_{PV}) de 2,172 metros,

substituindo na equação geral que determina o espaçamento entre a tubulação (w'), dada pela Equação 44.

$$w' = \frac{H_{PV} * L_{pv}}{L_{evap} - H} = \frac{2,172 * 1,303}{20 - 2,172} \cong 0,17 \text{ (m)} \quad (44)$$

Assim substituindo o resultado da Equação 44 na equação 45, obtém que o valor do número de voltas da serpentina será de 12 voltas. A Figura 4.3 ilustra o esquema utilizado.

$$N^{\circ}_{serp} = \frac{H_{PV}}{w'} = \frac{2,172}{0,17} \cong 12 \text{ (-)} \quad (45)$$

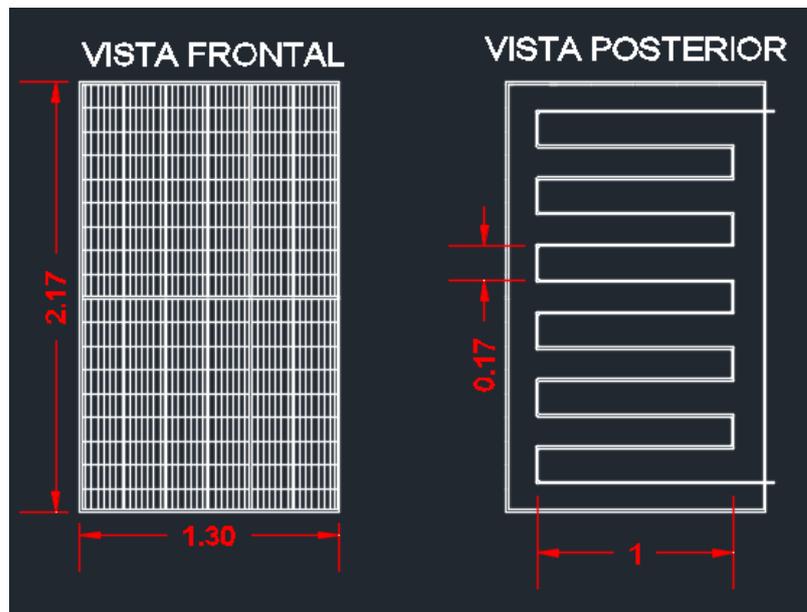


Figura 4.3- Esquema de montagem da serpentina.

4.6 Dimensionamento do condensador

Para o condensador foi calculado um coeficiente de transferência de calor para o fluido refrigerante de $1300 \text{ W/m}^2\text{K}$ e da água de $267 \text{ W/m}^2\text{K}$, por tanto o $U_{cond} = 222 \text{ W/m}^2\text{K}$. O calor do condensador foi calculado considerando o ciclo de refrigeração da tabela 2. De diâmetro da serpentina do condensador é $\frac{1}{2}$ polegada (11mm). A diferença entre os fluidos é de 10°C . A diferença de temperatura do fluido,

necessita ser uma diferença grande, pois assim não permite que haja uma ineficiência para troca de calor entre os fluidos, conforme Figura 4.4.

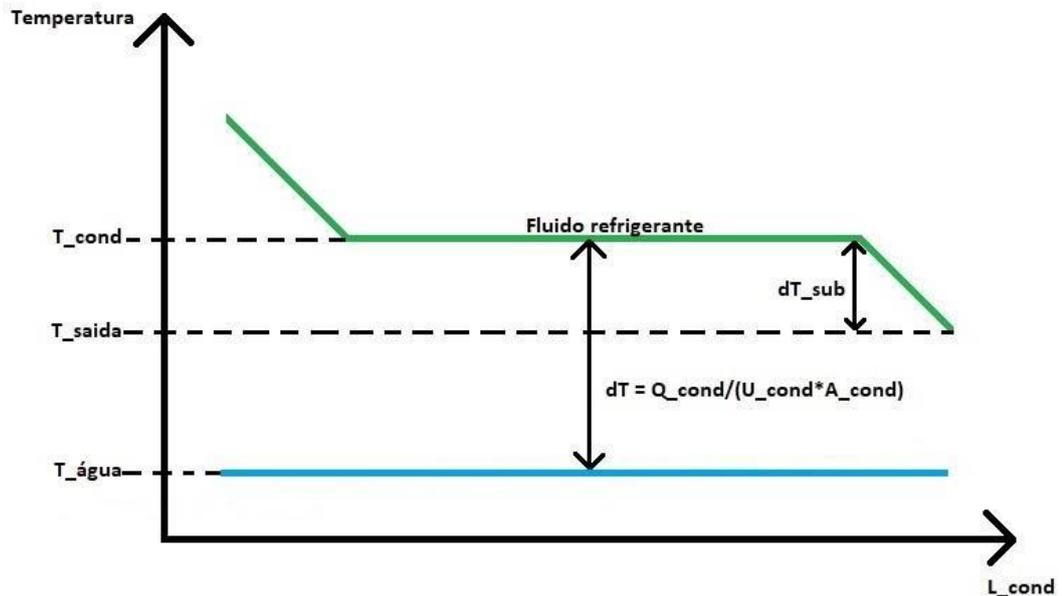


Figura 4.4- Diferença de temperatura entre os fluidos.

Assim é possível determinar o comprimento do condensador, conforme Equação 46.

$$L_{cond} = \frac{Q_{cond}}{U_{cond} * \Delta T * \pi * D_{cond}} = \frac{1564}{222 * 10 * \pi * 0,011} \cong 20 \quad (\text{metros}) \quad (46)$$

4.7 Aquecedor solar a vácuo (AQS)

Com os dados de temperatura e irradiação, fornecidos pelo IRN – Instituto de recursos naturais, da UNIFEI, foi dimensionado um sistema de aquecedor solar a vácuo, com 15 tubos, foi dimensionado um tanque de 270 litros, porém, comercialmente não se tem um tanque nesse tamanho ou é um abaixo a esse valor ou é um acima, neste caso foi escolhido foi um tanque de 300 litros. Ao dimensionar foram analisadas as temperaturas ambientes e a temperatura do tanque, potência fornecida pela irradiação, potência térmica e a irradiação.

A área mínima dos coletores necessária pode ser calculada por meio da Equação 47, em que A_c é a área dos coletores solares, η_c é a eficiência térmica dos

coletores que é igual a 0.7, Δt é o número de horas equivalentes de brilho solar e I_T é a irradiância solar global incidente sobre os coletores solares.

$$A_c = \frac{V * (T_d - T_{amb}) * c_p}{\eta_c * \Delta t * I_T} \quad (\text{m}^2) \quad (47)$$

V é o volume de água a ser aquecido, T_d é a temperatura desejada da água quente, T_{amb} é a temperatura da água fria e c_p é a capacidade térmica da água.

$$A_c = \frac{300 * (45 - 20) * 4180}{421 * (12 * 3600) * 0,7} = 2,4 \quad (\text{m}^2)$$

5 RESULTADOS

Os resultados são analisados para quatro tipos de sistemas, o Aquecedor solar a vácuo, o Sistema fotovoltaico On-grid e o sistema em estudo PV-T com bomba de calor. Foi analisado o período de um ano, nesse capítulo, apresentados os gráficos diários, para dias aleatórios, e as tabelas mensais e anuais dos sistemas.

5.1 Chuveiro elétrico

Analisando a energia consumida pelo chuveiro elétrico de 5500 W de potência, para uma situação, onde reside em uma residência três pessoas, nas quais usam o chuveiro uma vez ao dia, durante um período de 10 minutos por pessoa, assim, na Tabela 5.1, tem os valores calculados do consumo de energia do chuveiro. Com esses valores pode-se comparar com os valores de energia gerada pelos quatros sistemas, ou seja, verificar se a energia gerada pelos sistemas é capaz de suprir a energia do chuveiro.

Tabela 5.1- Média mensal e anual do consumo do chuveiro.

Mês	Energia (kWh/mês)
Janeiro	85
Fevereiro	77
Março	85
Abril	83
Maio	85
Junho	83
Julho	85
Agosto	85
Setembro	83
Outubro	85
Novembro	83
Dezembro	85
Media Anual	84

5.2 Sistema de aquecedor solar a vácuo

Figura 5.1 mostra que a temperatura do tanque tende a crescer ao longo do dia, tendo um aumento de temperatura de aproximadamente 5°C por hora até às 10 horas depois disso a temperatura aumenta de 1°C a cada hora das 10 horas às 15 horas, isso significa que a água aquecida entra no tanque por um período de aproximadamente 7 horas por dia.

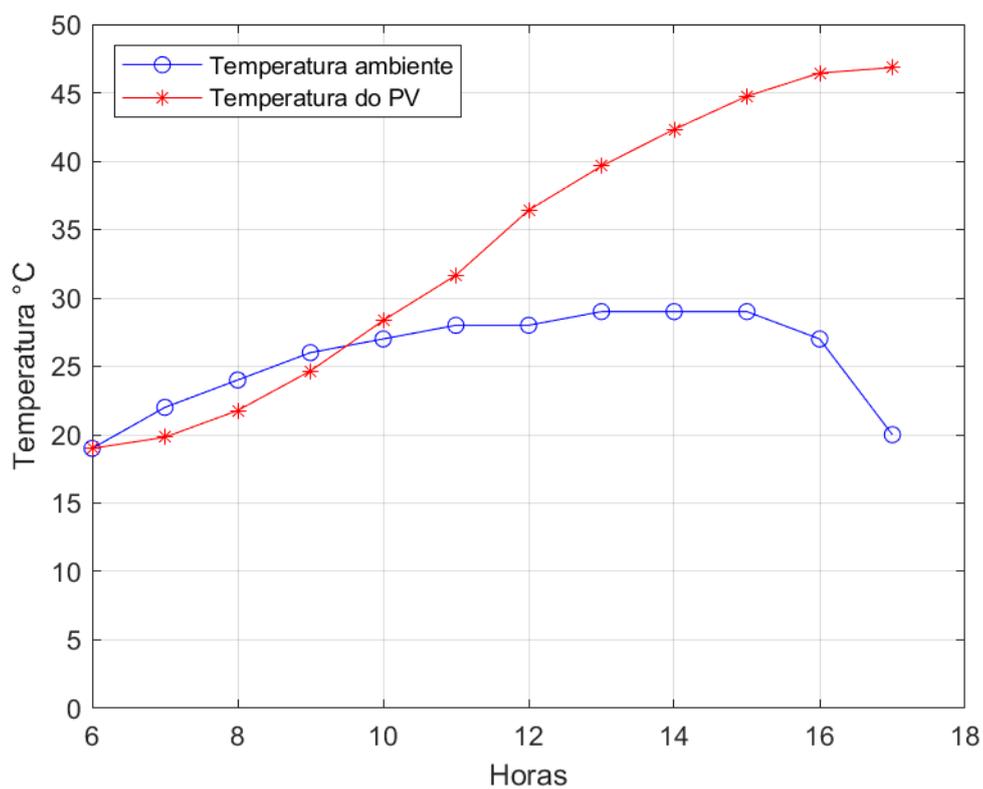


Figura 5.1- Temperatura ambiente e do tanque para o dia 20/03/2022.

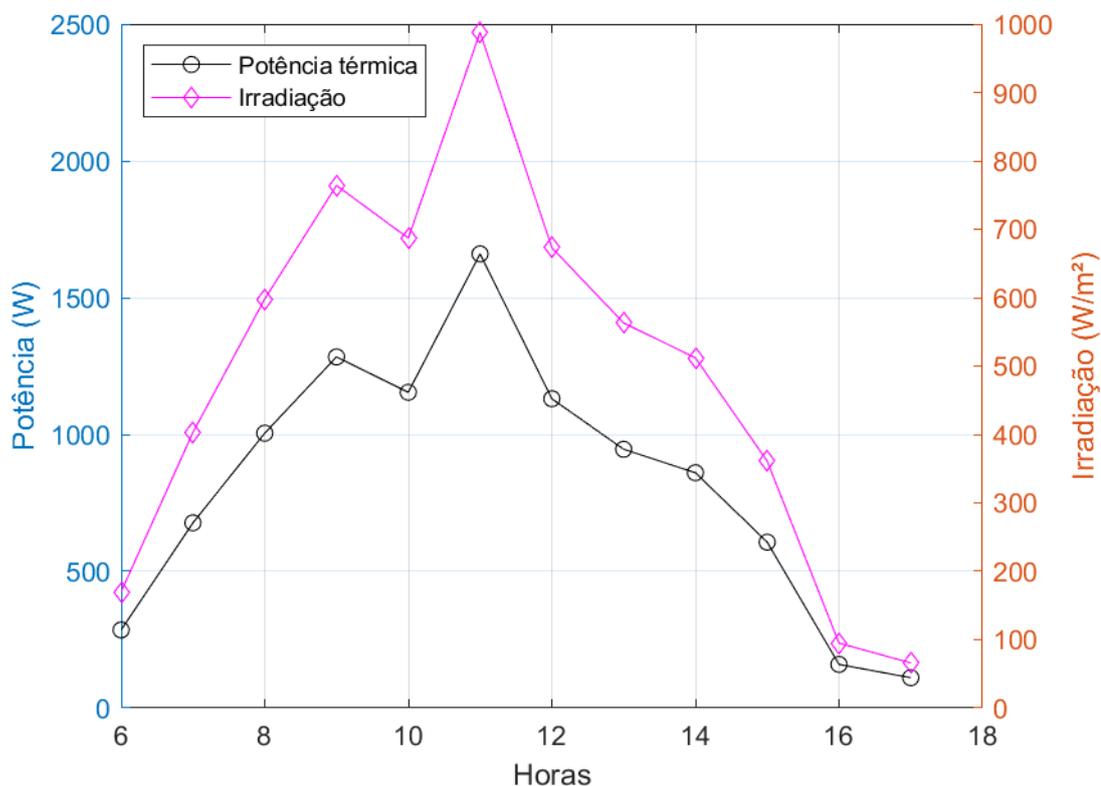


Figura 5.2 - Das potência e irradiação para o dia 20/03/2022.

De acordo com o Figura 5.3, o período a irradiação solar é alto, no entanto, a potência associada à irradiação solar corresponde à disponibilidade bruta de energia solar, ao passo que a potência fornecida por um sistema de aquecedor solar equivale à quantidade de energia que tal sistema é capaz de converter eficientemente em energia térmica utilizável, ou seja, não importa quão eficiente seja o sistema, ele nunca será capaz de converter 100% da energia solar em energia térmica.

O aumento de temperatura ao longo do dia, como mostra a Figura 5.3, passa a ser mais constante, ou seja, das 8 horas até as 15 horas a temperatura aumenta de 3°C em 3°C, e a diferença de temperatura entre o tanque e o ambiente é menor aproximadamente de 5°C.

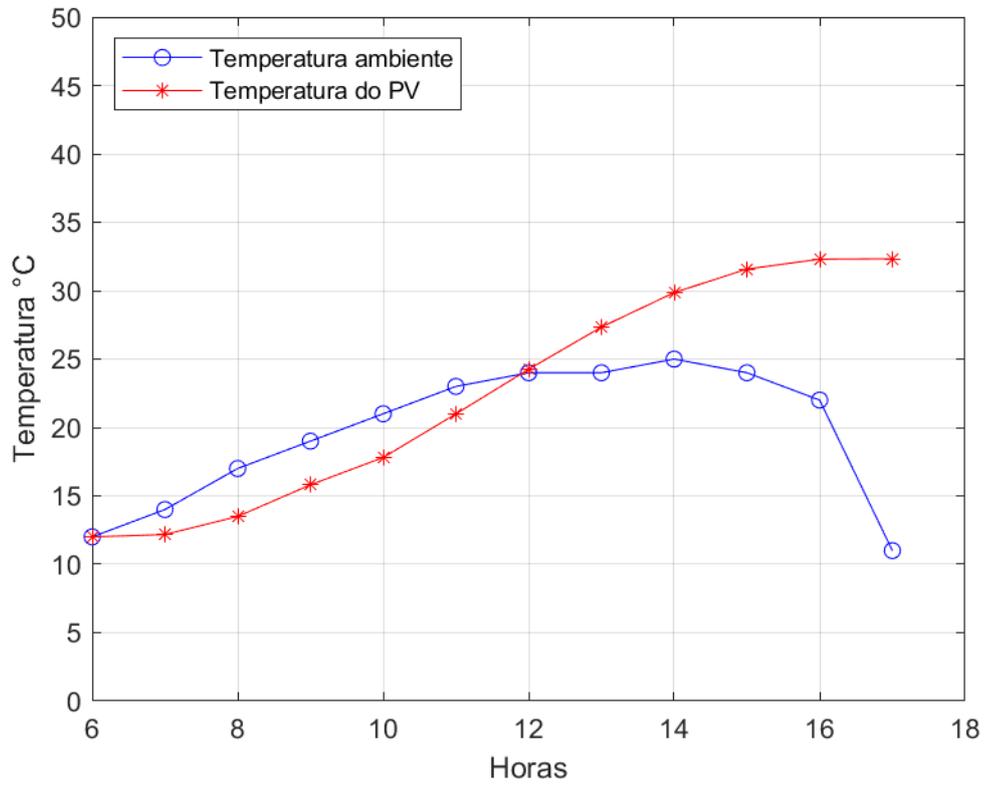


Figura 5.3 - Temperatura ambiente e do tanque para o dia 21/06/2022.

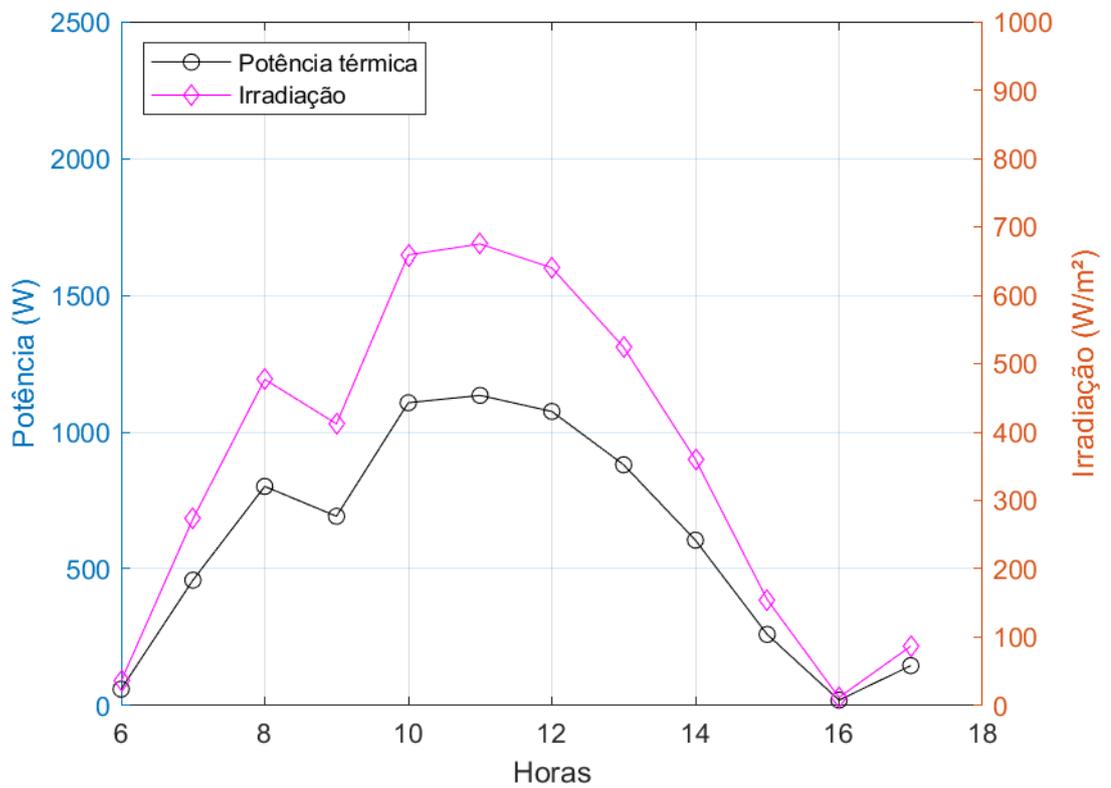


Figura 5.4 - Das potências e irradiação para o dia 21/06/2022.

Ao contrário de outros dias, em que a irradiação solar pode chegar em determinada hora a casa dos 1000 W/m², em alguns a irradiação solar pode chegar próximos aos 700 W/m², isso resulta em uma redução da potência fornecida pela irradiação conforme o Figura 5.4, assim, a potência que realmente aquece a água, reduz muito, ou seja, não há muito aproveitamento da conversão da energia solar para a térmica.

Observa que a temperatura do tanque a partir das 10 horas ela aumenta de 5°C em 5°C, e que a diferença de temperatura no final do dia é próxima dos 10°C, assim, isso significa que a água aquecida entra no tanque por um período de aproximadamente 8 horas por dia, conforme Figura 5.5.

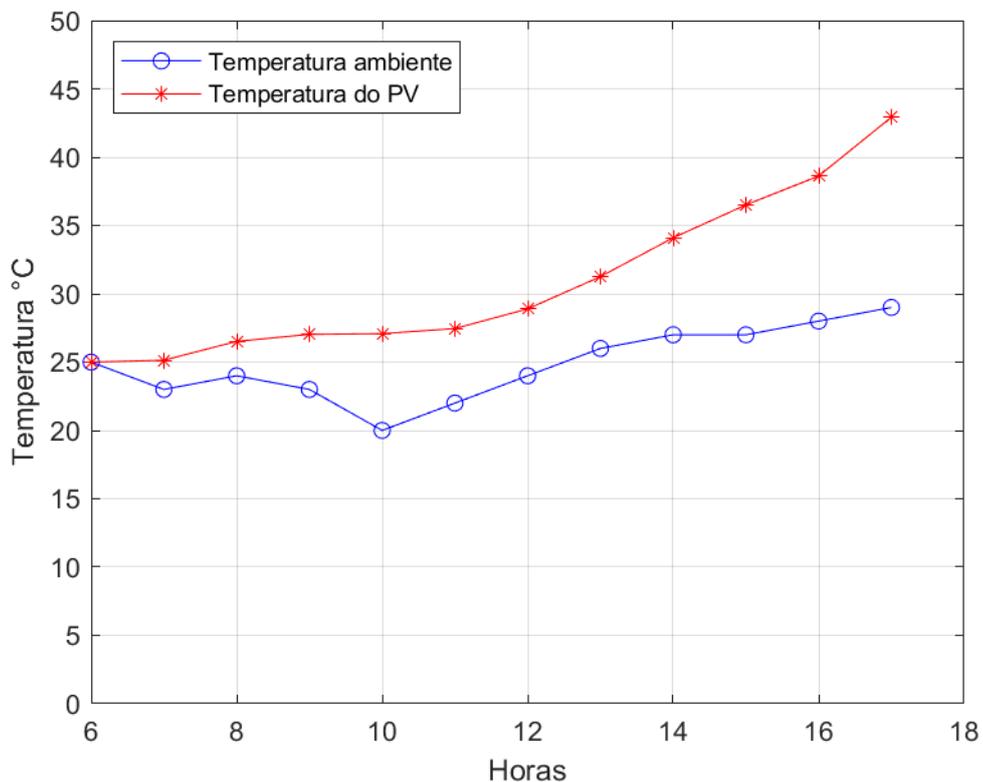


Figura 5.5 – Temperatura ambiente e do tanque para o dia 23/09/2022.

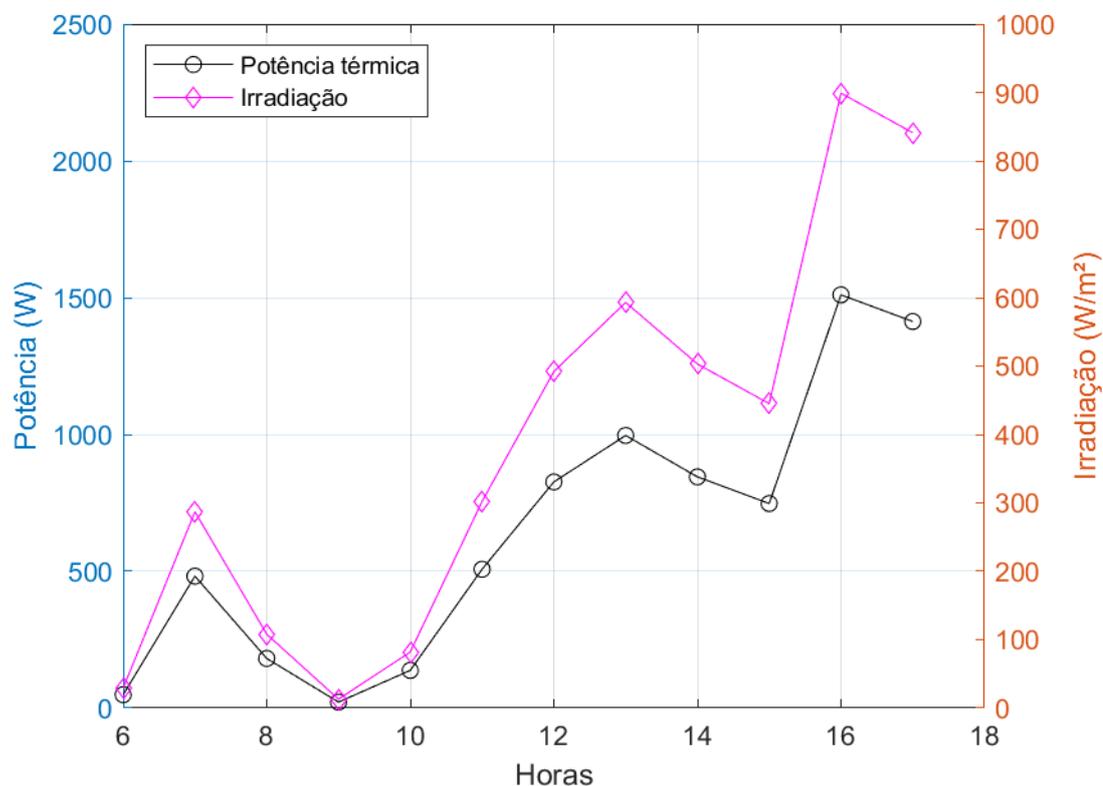


Figura 5.6 - Das potências e irradiação para o dia 23/09/2022.

No entanto, a irradiação solar nesse período varia muito, como podemos observar na Figura 5.6, mesmo podendo chegar a máxima irradiação de 900 W/m², isso prejudica o sistema, pois a energia convertida em térmica não é tão aproveitosa assim.

Como mostrado na Figura 5.7, tente as temperaturas do tanque e do ambiente serem muito próximas, uma vez que esse período é chuvoso, isso faz com que as temperaturas sejam mais constantes, assim, a diferença de temperatura entre o tanque e o ambiente é de aproximadamente 5°C.

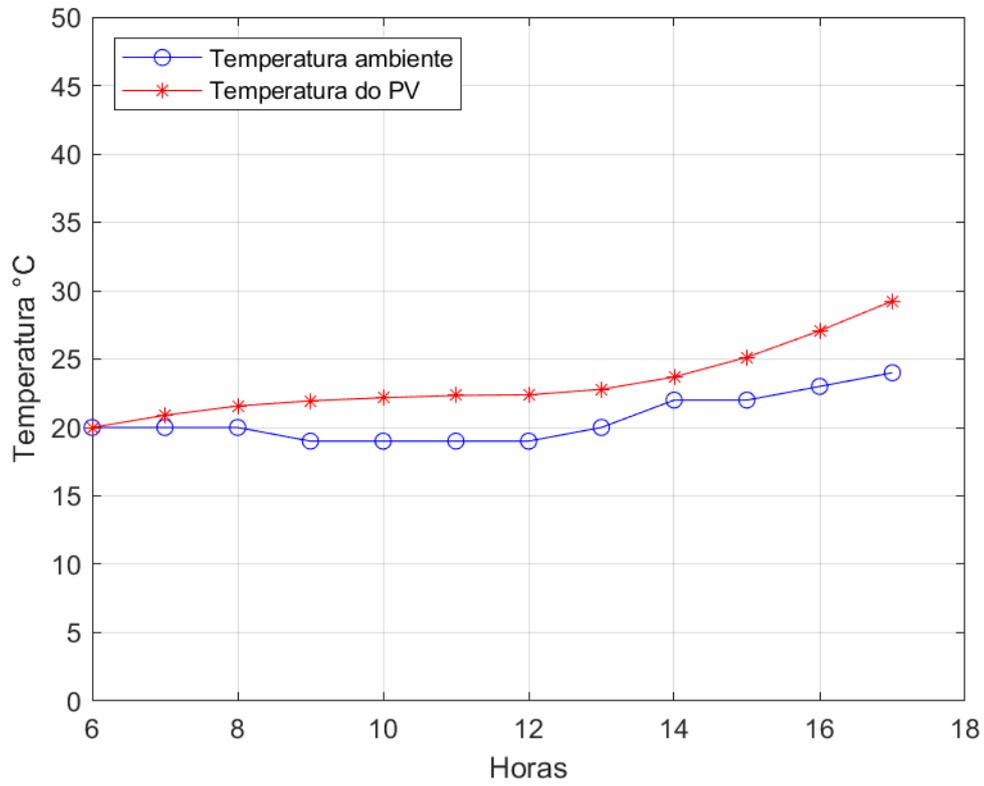


Figura 5.7 - Temperatura ambiente e do tanque, para o dia 22/12/2022.

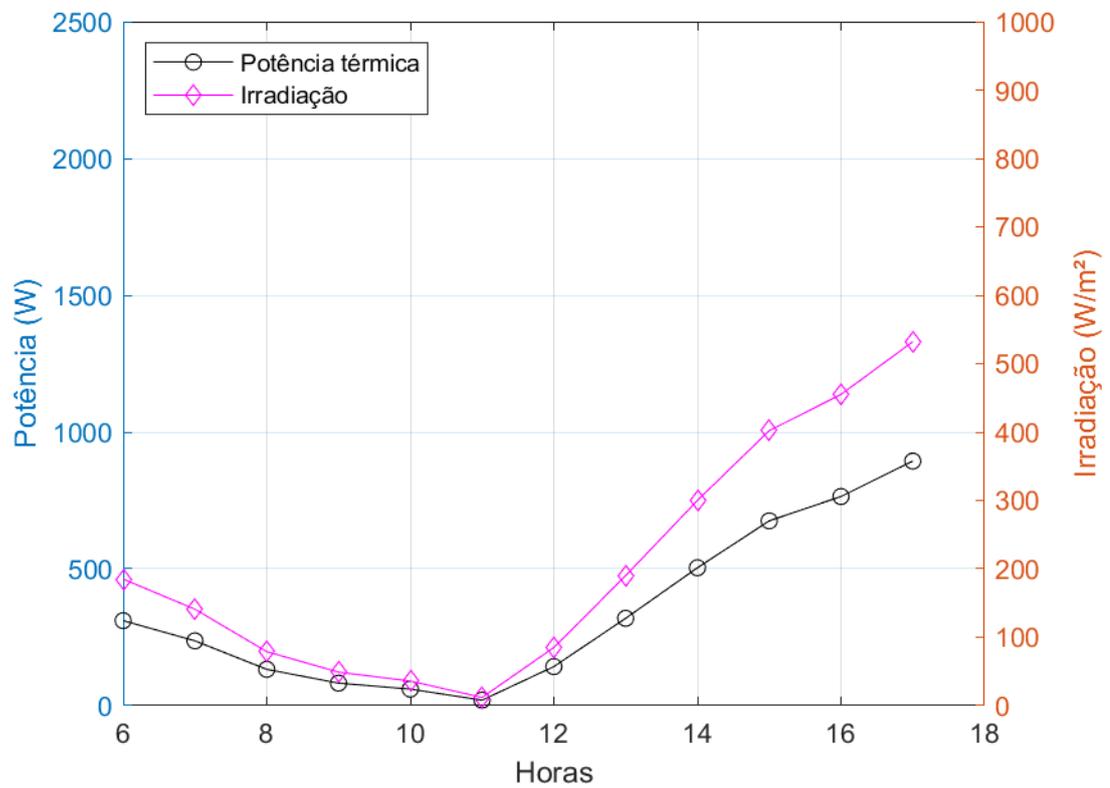


Figura 5.8 - Das potências e irradiação, para o dia 22/12/2022.

Para que a irradiação solar diminua tenha diminuído tanto nesse dia, provavelmente esse dia devia estar muito nublado, isso diminui a irradiação, assim, o sistema não absorve muito a energia fornecida pela irradiação, com isso a conversão de energia solar para a energia térmica é muito baixa, como é mostrado na Figura 5.8.

A Tabela 5.2, mostra a eficiência global do sistema, que é a proporção de energia solar que é efetivamente convertida em energia térmica utilizável, levando em consideração todas as perdas no sistema. Isso inclui perdas no coletor solar, perdas durante o transporte do calor para o ponto de uso e perdas para o ambiente. Com essa eficiência é calculada a energia térmica que realmente o sistema irá gerar, assim, podemos observar que a energia térmica gerada é suficiente para suprir a energia consumida pelo chuveiro.

No entanto, esse tipo de sistema possui algumas desvantagens, uma delas é o fato os tubos a vácuo podem precisar ser substituídos de tempos em tempos, o que pode adicionar custos de manutenção, o que acaba fazendo o sistema tenha um custo alto. Além disso, em áreas de alta insolação e em períodos de baixa demanda por água quente (como no verão quando as pessoas estão de férias), o sistema pode superaquecer. Isso pode levar a problemas de pressão e requer sistemas de alívio de pressão e calor.

Tabela 5.2– Médias do sistema de AQS a vácuo.

Mês	Temperatura Ambiente (°C)	Irradiação (W/m²)	Energia térmica (kWh/mês)	Temperatura final do tanque (°C)	Eficiência do PV Média
Janeiro	25	457	286	60	66,38%
Fevereiro	24	415	234	59	64,36%
Março	24	414	259	56	62,42%
Abril	23	429	259	49	65,72%
Mai	21	384	240	49	66,08%
Junho	19	388	235	52	66,52%
Julho	19	422	264	49	66,15%
Agosto	24	441	276	58	65,19%
Setembro	25	399	241	56	65,58%
Outubro	23	398	249	54	67,53%
Novembro	24	494	299	61	66,64%
Dezembro	24	414	258	58	65,71%
Média Anual	23	421	258	55	65,69%

5.3 Sistema fotovoltaico

Analisando as Figuras 5.9 a 5.16 de temperaturas, irradiação, potência térmica e elétrica. Observa-se que a temperatura no painel é alta independente da estação do ano. No entanto, a conversão da energia térmica em eletricidade é geralmente menos eficiente do que a conversão direta da irradiação solar pelos painéis fotovoltaicos, isso faz com que o sistema seja menos eficiente. A temperatura da placa sempre irá trabalhar próximo da temperatura de teste operacional (NOCT), no entanto, sua eficiência em quase em todo tempo irá ser abaixo dos 19%, ou seja, um painel dificilmente trabalhara com sua potência de pico.

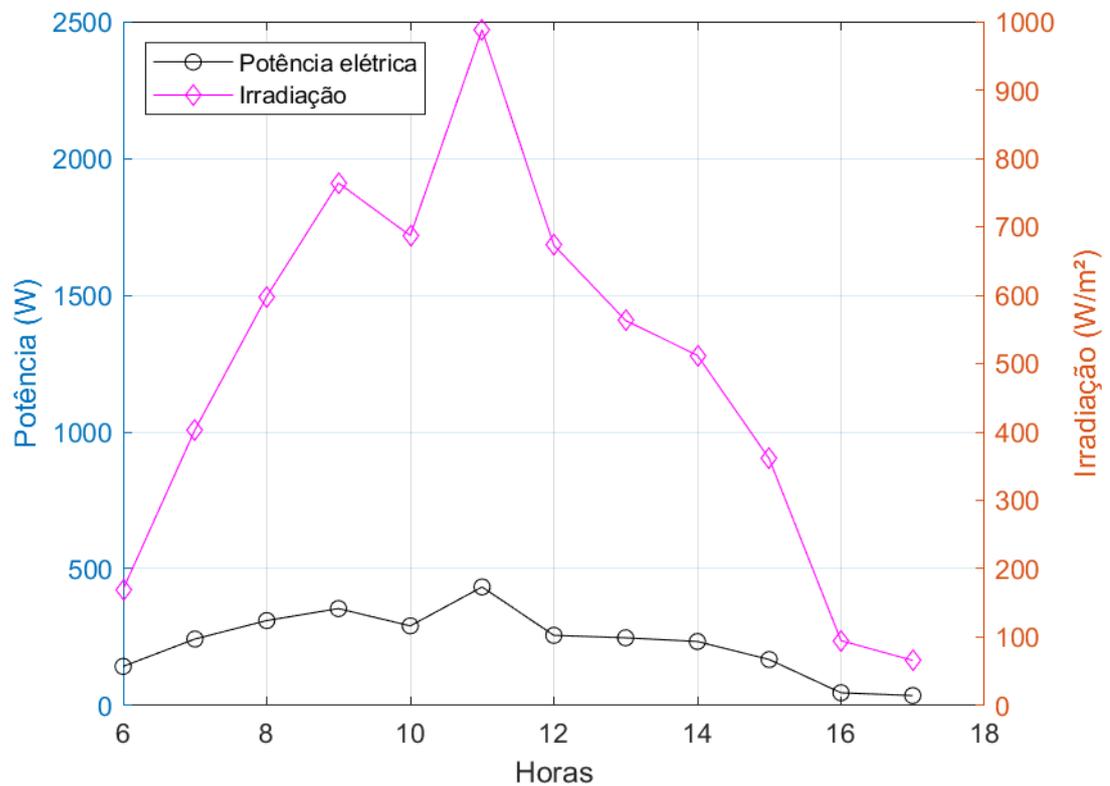


Figura 5.9 – Potências e irradiação para o dia 20/03/2022.

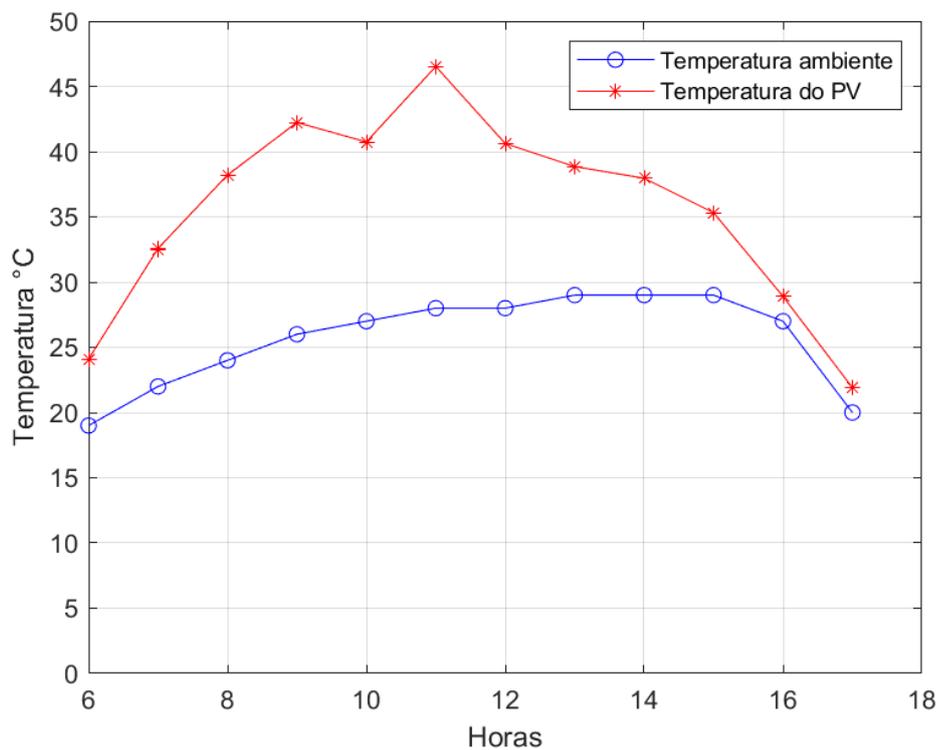


Figura 5.10 – Temperaturas ambiente e do PV para o dia 20/03/2022.

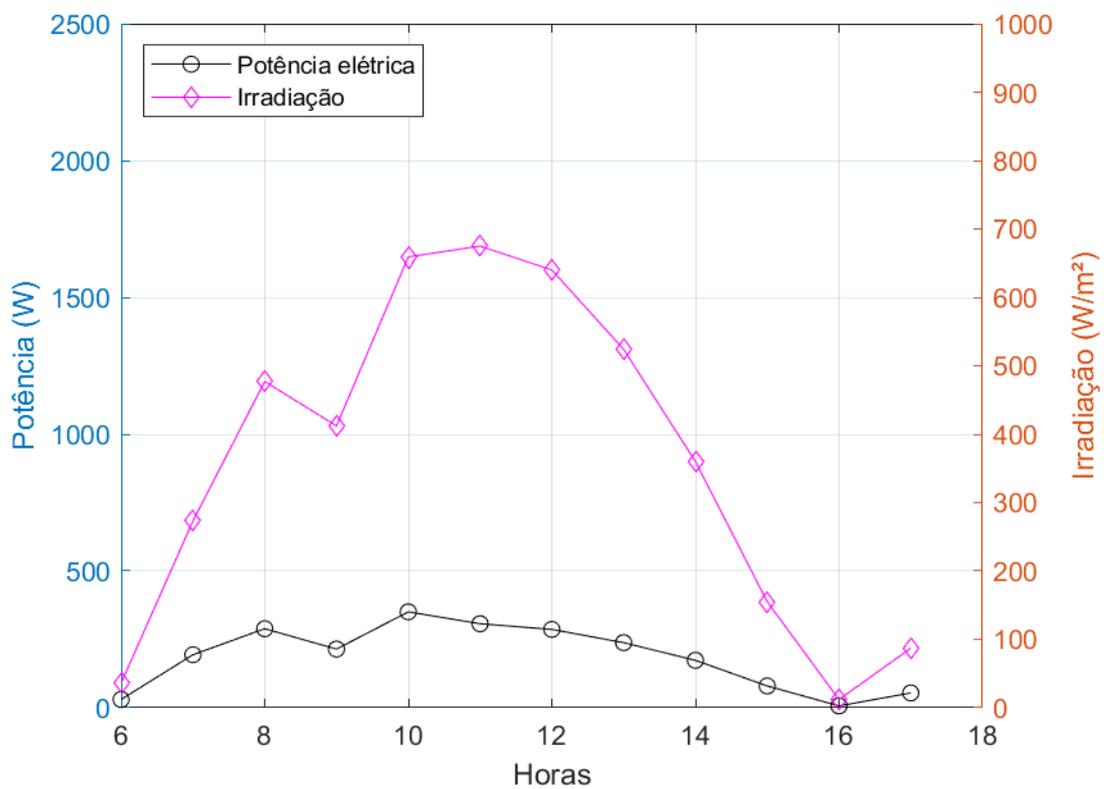


Figura 5.11 - Potência e irradiação solar para o dia 21/06/2022.

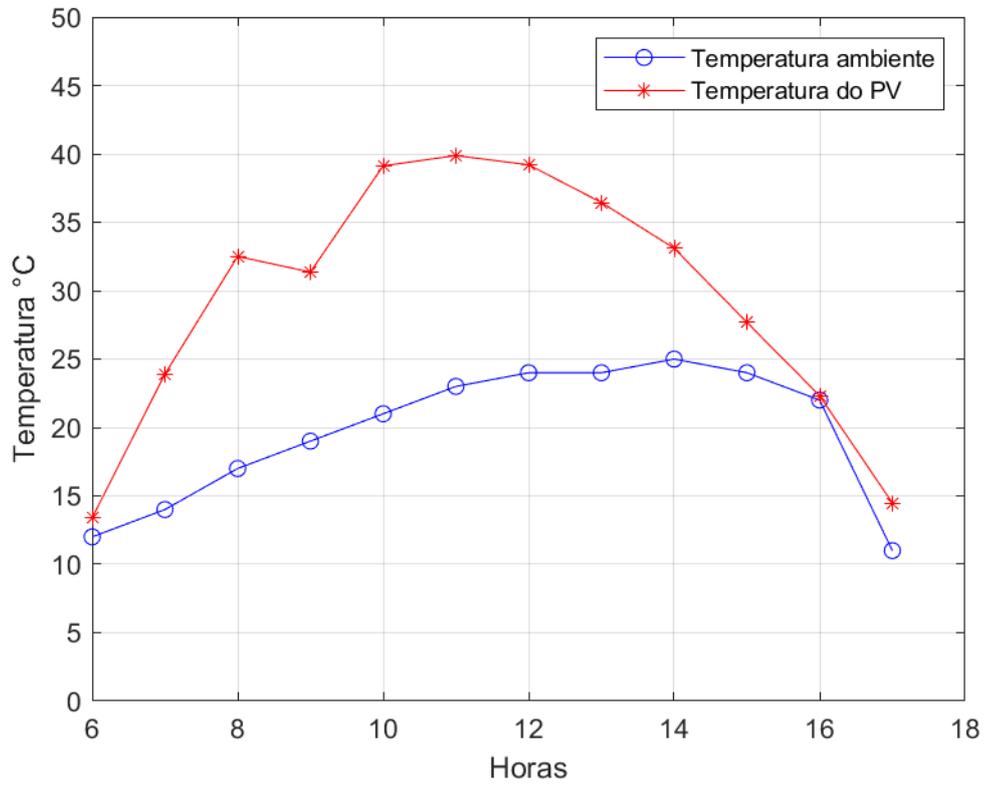


Figura 5.12 – Temperaturas ambiente e do PV para o dia 21/06/2022.

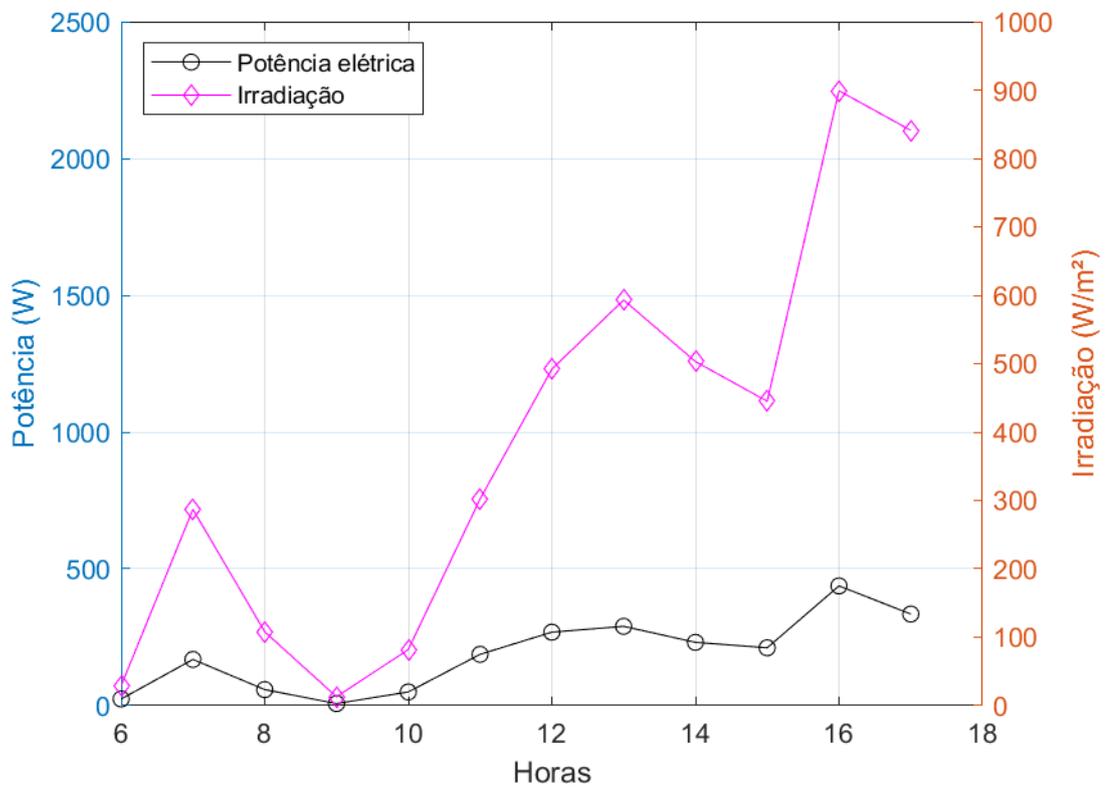


Figura 5.13 – Potências e irradiação solar para o dia 23/09/2022.

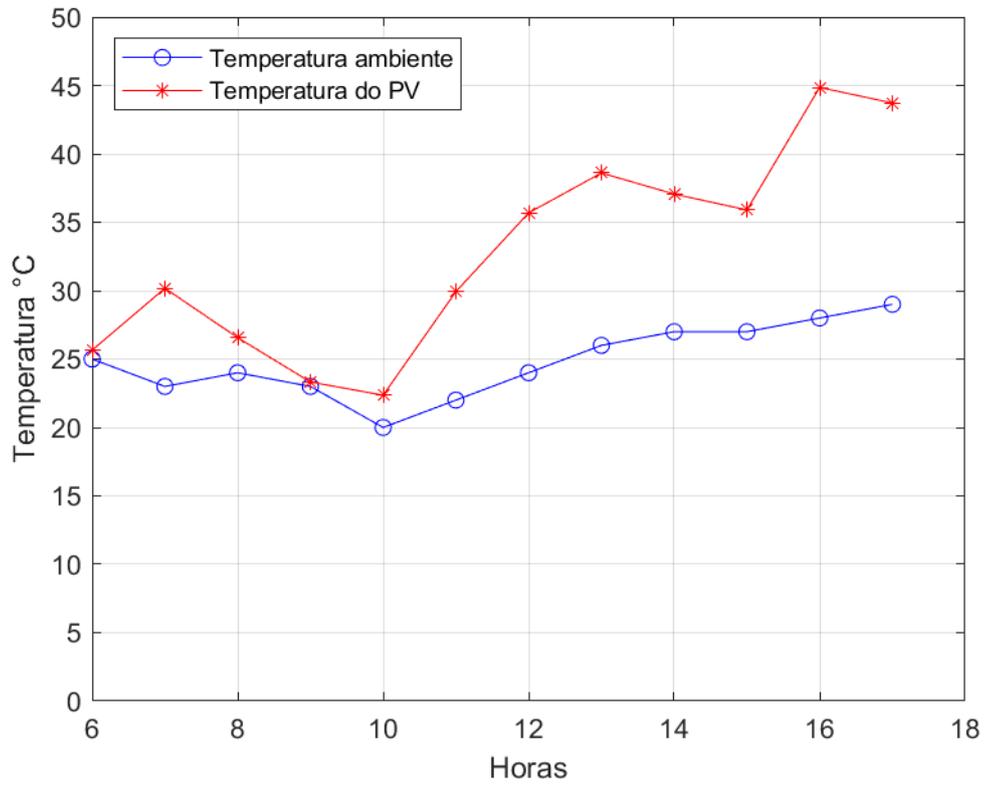


Figura 5.14 - Temperaturas ambiente e do PV para o dia 23/09/2022.

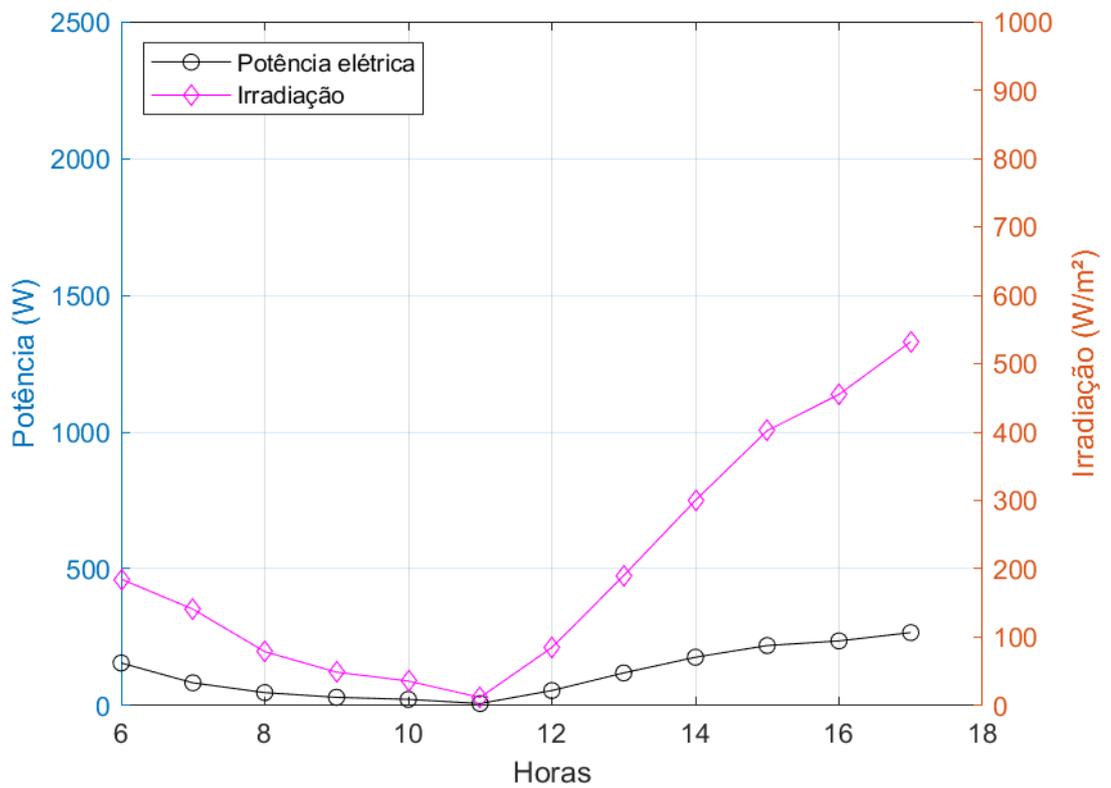


Figura 5.15 – Potências e irradiação solar para o dia 22/12/2022.

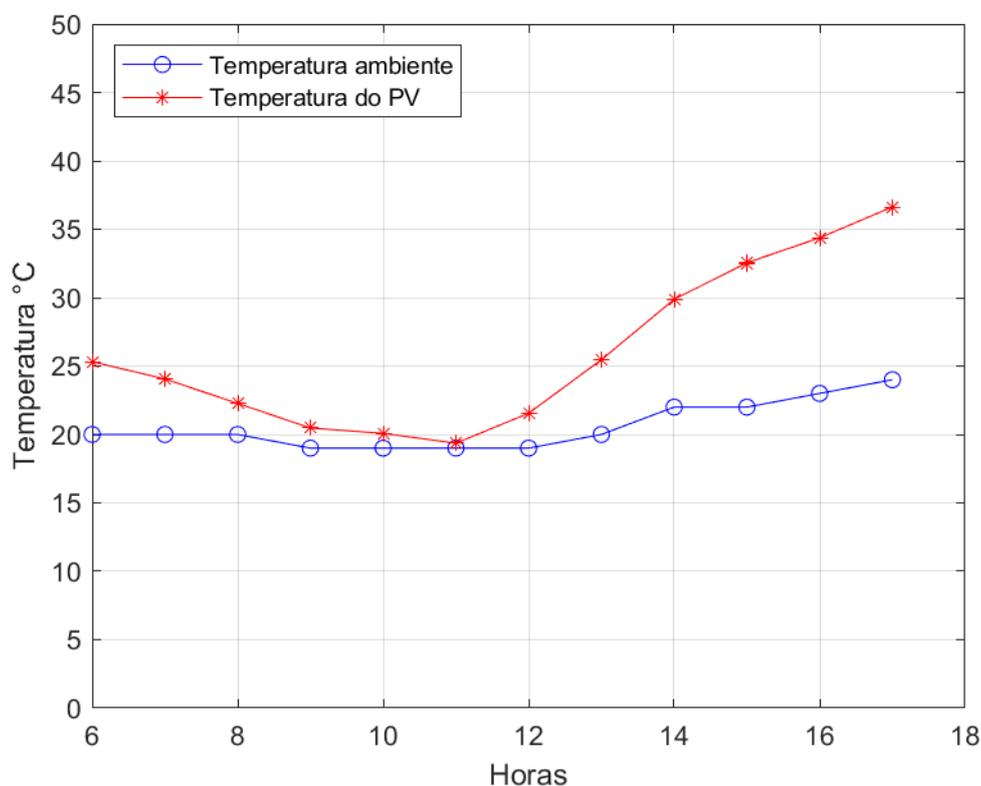


Figura 5.16 - Temperaturas ambiente e do PV para o dia 22/12/2022.

Tabela 5.3 - Médias da energia elétrica.

Mês	Temperatura Ambiente (°C)	Irradiação (W/m ²)	Temperatura do PV (°C)	Potência elétrica (W)	Energia Gerada (kWh/mês)	Eficiência do PV
Janeiro	25	457	32	229	85	18,66%
Fevereiro	24	415	30	208	70	19,14%
Março	24	414	31	209	78	19,04%
Abril	23	429	30	218	79	19,15%
Maio	21	384	29	205	76	19,75%
Junho	19	388	28	210	76	20,04%
Julho	19	422	29	226	84	19,76%
Agosto	24	441	31	222	82	18,92%
Setembro	25	399	30	211	76	19,35%
Outubro	23	398	30	196	73	19,32%
Novembro	24	494	32	234	84	18,40%
Dezembro	24	413	30	208	77	19,14%
Média Anual	23	421	30	215	78	19,22%

A tabela 5.3, mostra que a diferença de temperatura do ambiente e o da placa solar pode chegar a uma média de 10°C. Se considerarmos que na tabela 5.1, a média energia consumida pelo chuveiro é de 84 kWh/mês e que um sistema PV convencional

possui uma média de 78 kWh/mês, isso significa que só a energia gerada pelo painel fotovoltaico não é capaz de suprir sozinho a demanda elétrica do chuveiro, ou seja, necessitaria ainda sim da energia elétrica fornecida pela concessionária.

5.4 Sistema PV-T com bomba de calor

Nos gráficos 17 ao 20, verificamos que com o sistema PV-T com bombas de calor as temperaturas do painel fotovoltaico e evaporador varia ao longo do dia, no entanto, as temperaturas de condensação e do tanque tende a aumentar mesmo quando as temperaturas do painel e do evaporador diminuem, isso significa que a troca de calor do sistema é muito eficiente, pois o sistema aproveita bem a energia térmica gerada pelo painel. Além disso observa que a temperatura do tanque não será abaixo de 45°C no fim do dia, isso significa que o evaporador sempre estará nas condições trabalhando nas condições NOCT.

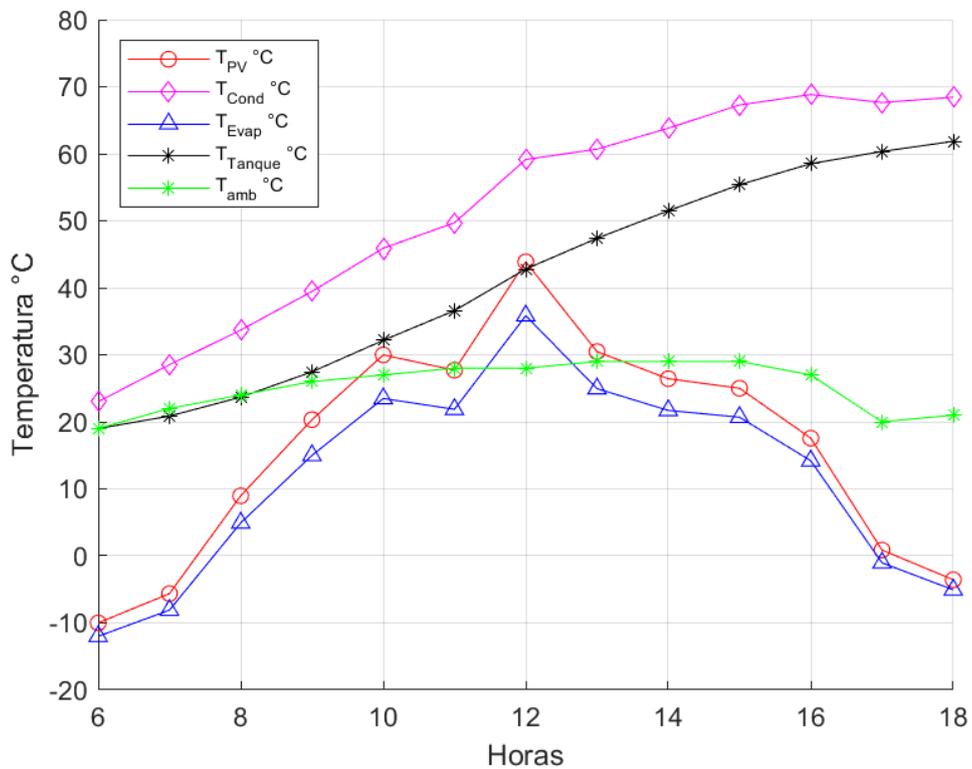


Figura 5.17 - Temperaturas do sistema PV-T com BC.

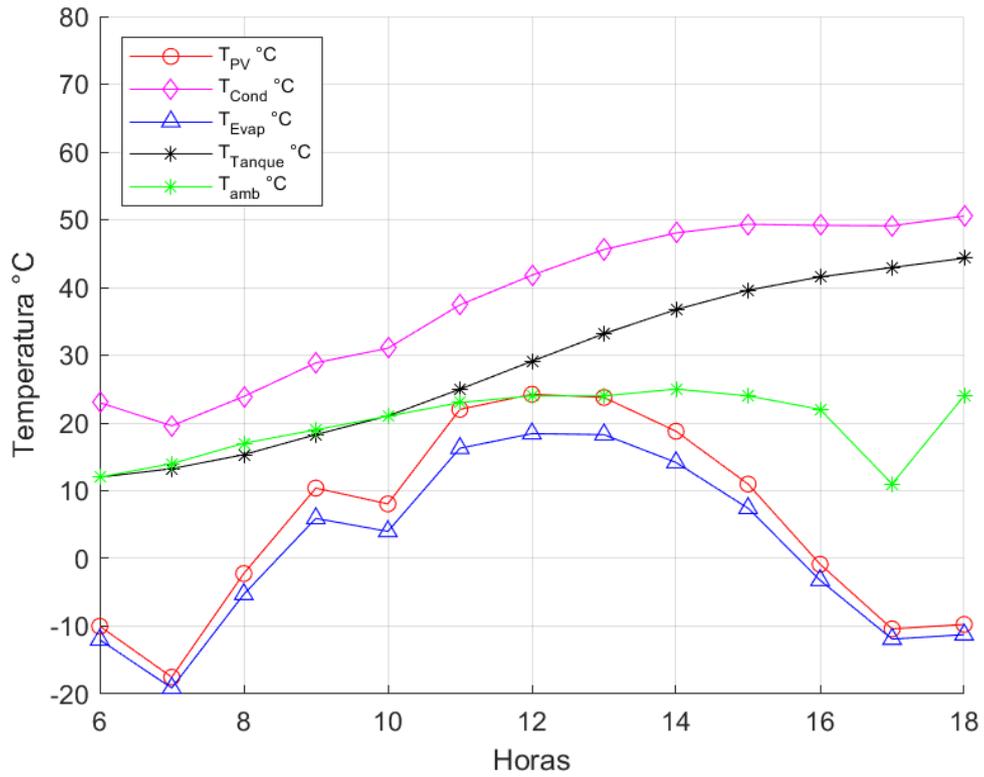


Figura 5.18 - Temperaturas do sistema PV-T com BC.

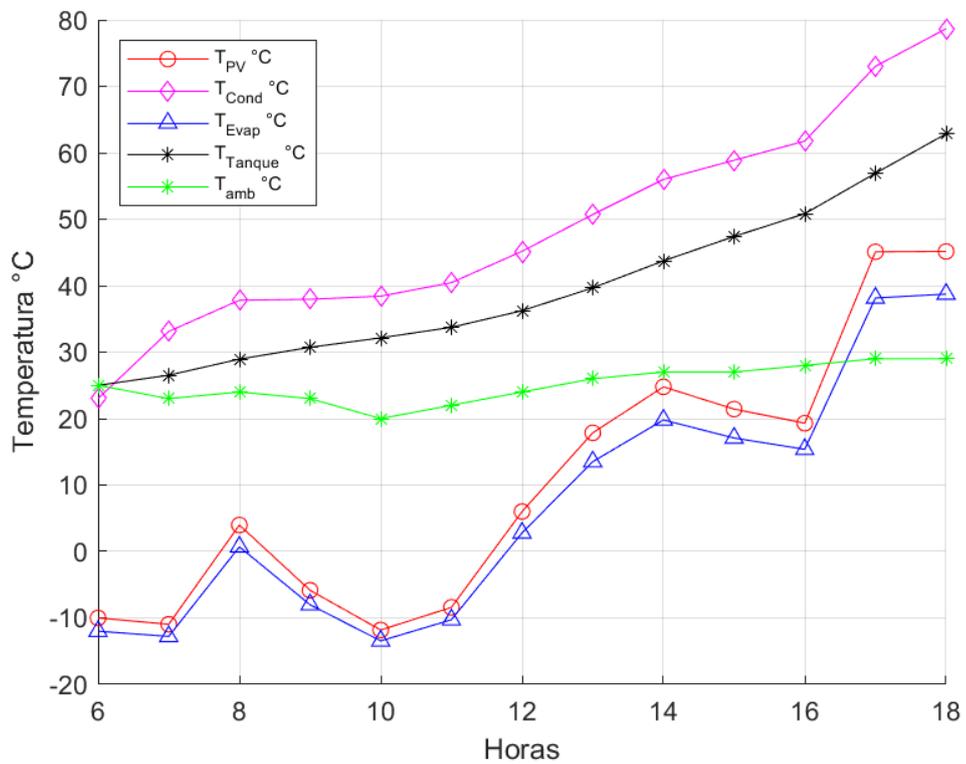


Figura 5.19 - Temperaturas do sistema PV-T com BC.

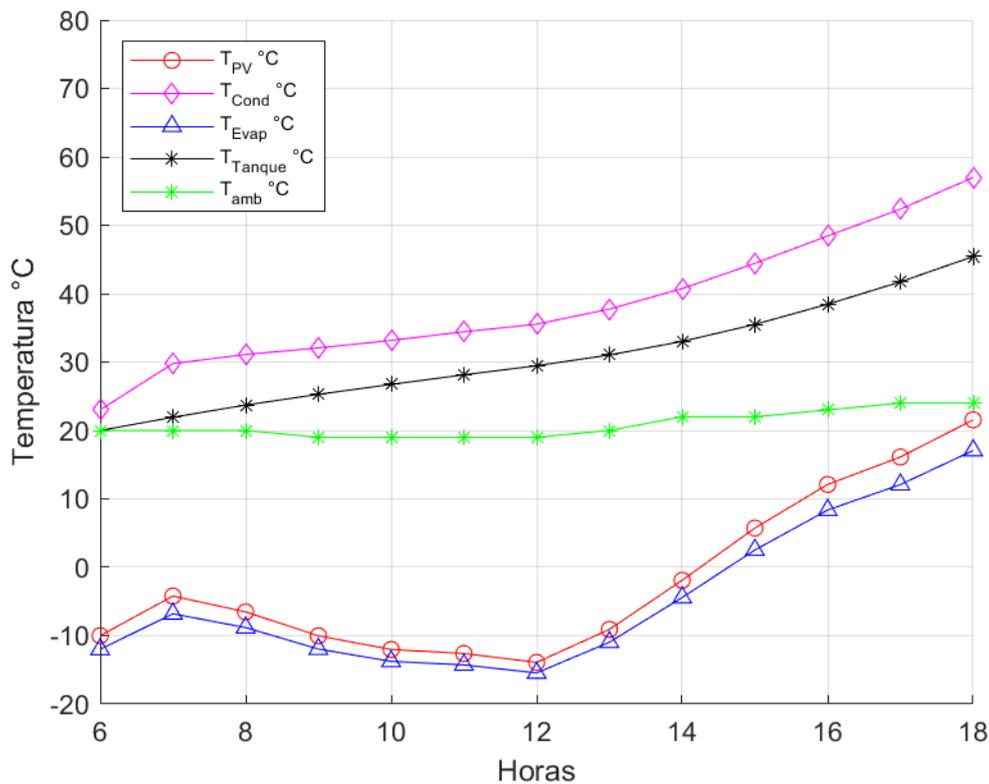


Figura 5.20 - Temperaturas do sistema PV-T com BC.

Nas Figuras 5.21 a 5.26, observa que a irradiação solar tende a ser mais baixa isso acontece por causa do clima e a estação do ano. As potências elétrica e térmica são baixas no período da manhã, como a potência térmica é influenciada pela temperatura dos painéis fotovoltaicos, ela seguirá um padrão semelhante ao da potência elétrica, embora possa haver um atraso térmico devido à inércia térmica do sistema. A eficiência do evaporador é afetada pela temperatura do fluido que está sendo resfriado. Em temperaturas mais altas, o evaporador pode operar com uma diferença menor entre a temperatura do fluido de refrigeração e a temperatura do ar ambiente, o que pode resultar em uma menor eficiência. Por outro lado, em temperaturas mais baixas, a diferença de temperatura entre o fluido de refrigeração e o ar ambiente tende a ser maior, o que pode aumentar a eficiência do evaporador.

Já a eficiência do condensador é afetada pela temperatura do ar ou fluido que está sendo usado para dissipar o calor do refrigerante. Em temperaturas mais altas, o condensador pode ter dificuldade em transferir o calor para o ambiente, o que pode reduzir sua eficiência. Em contrapartida, em temperaturas mais baixas, o condensador pode dissipar o calor com mais facilidade, resultando em uma maior eficiência.

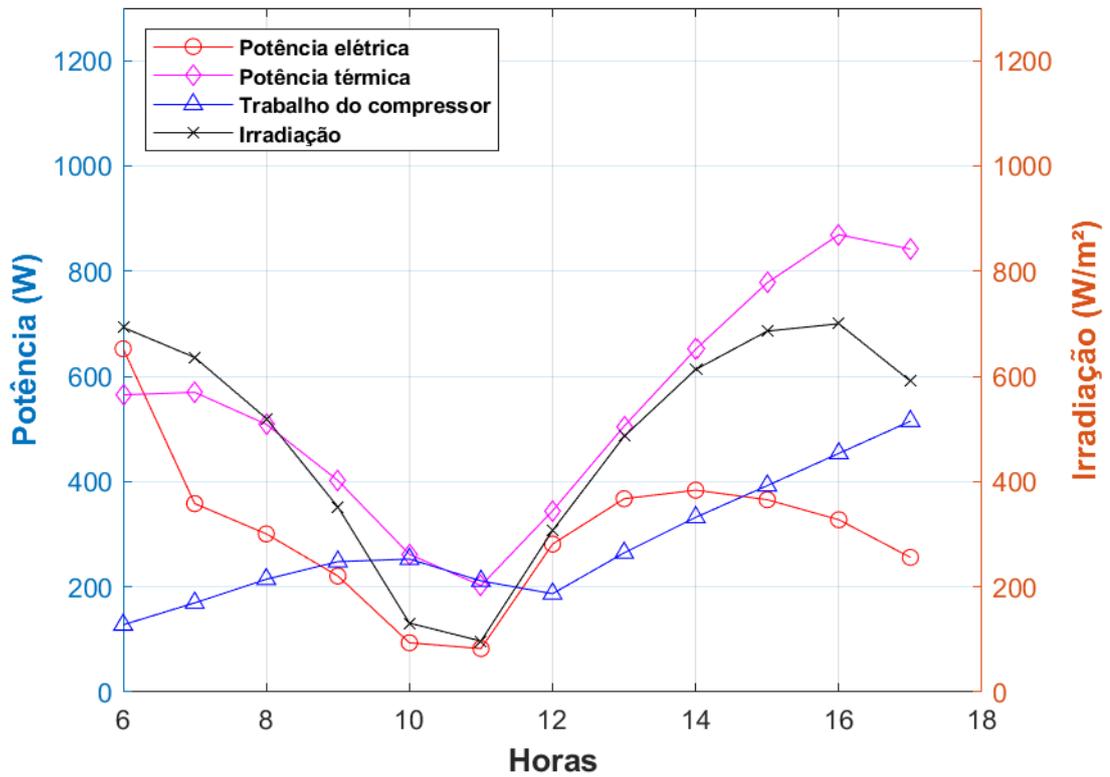


Figura 5.21 - Potências, Trabalho do compressor e irradiação solar da PV-T com bomba de calor.

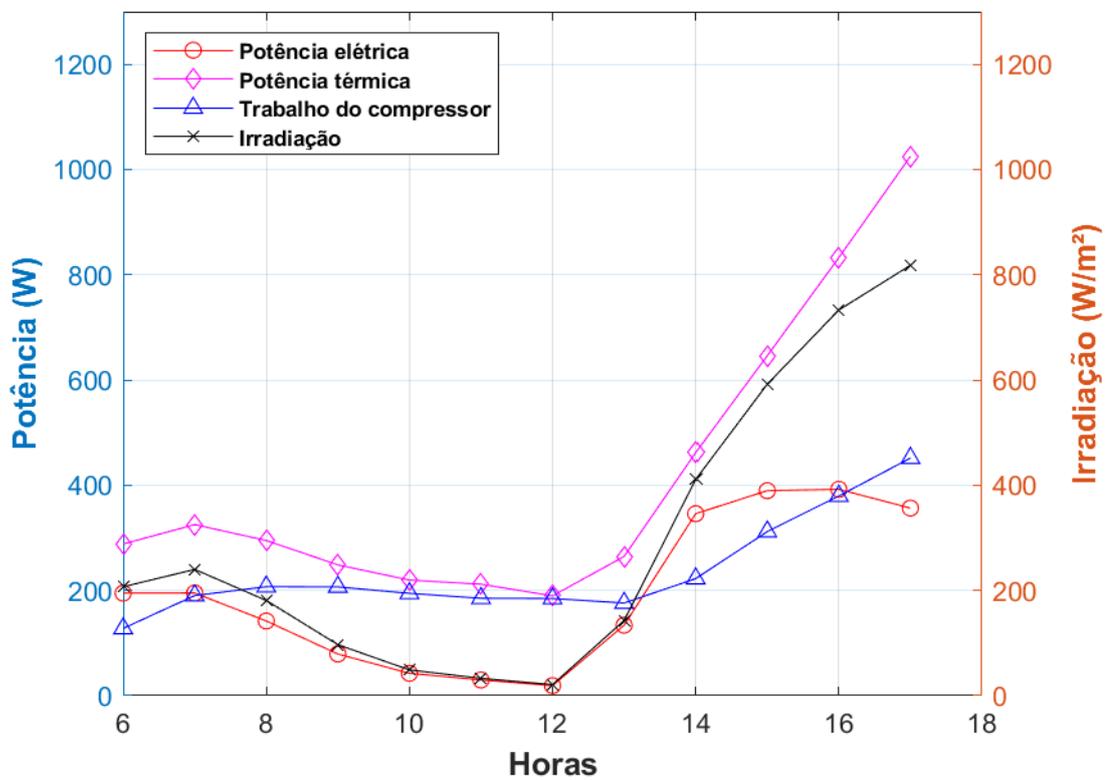


Figura 5.22 - Potências, Trabalho do compressor e irradiação solar PV-T com bomba de calor.

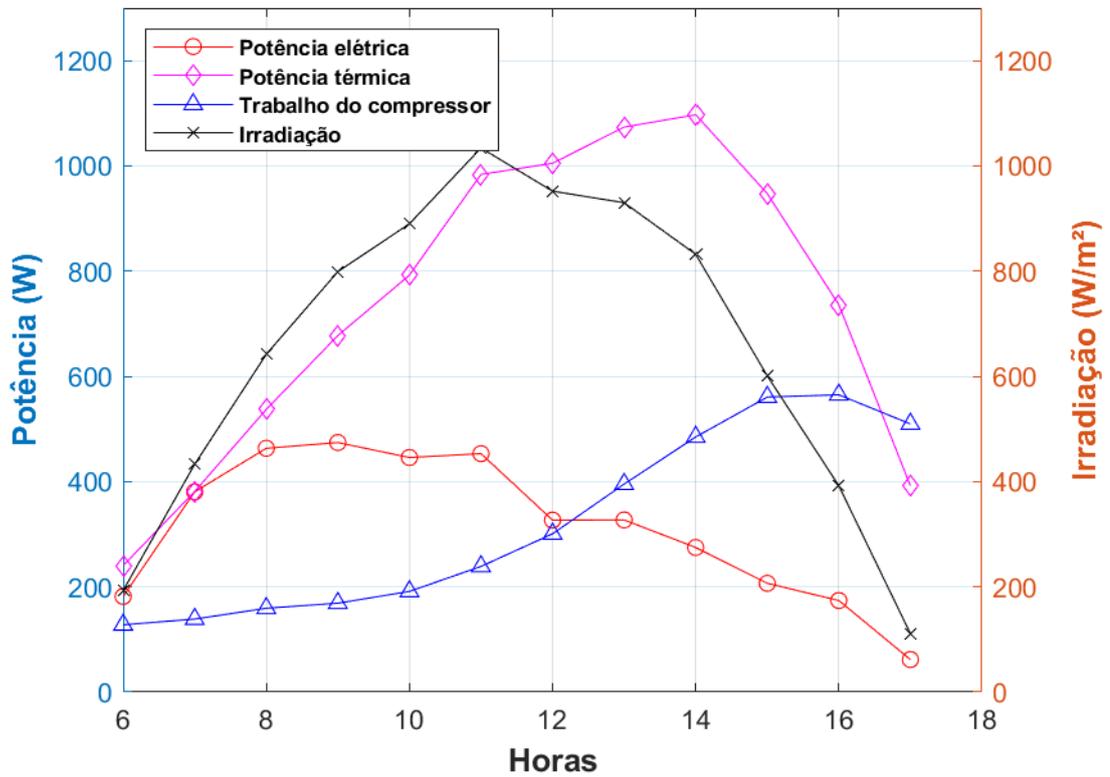


Figura 5.23 - Potências, Trabalho do compressor e irradiação solar PV-T com bomba de calor.

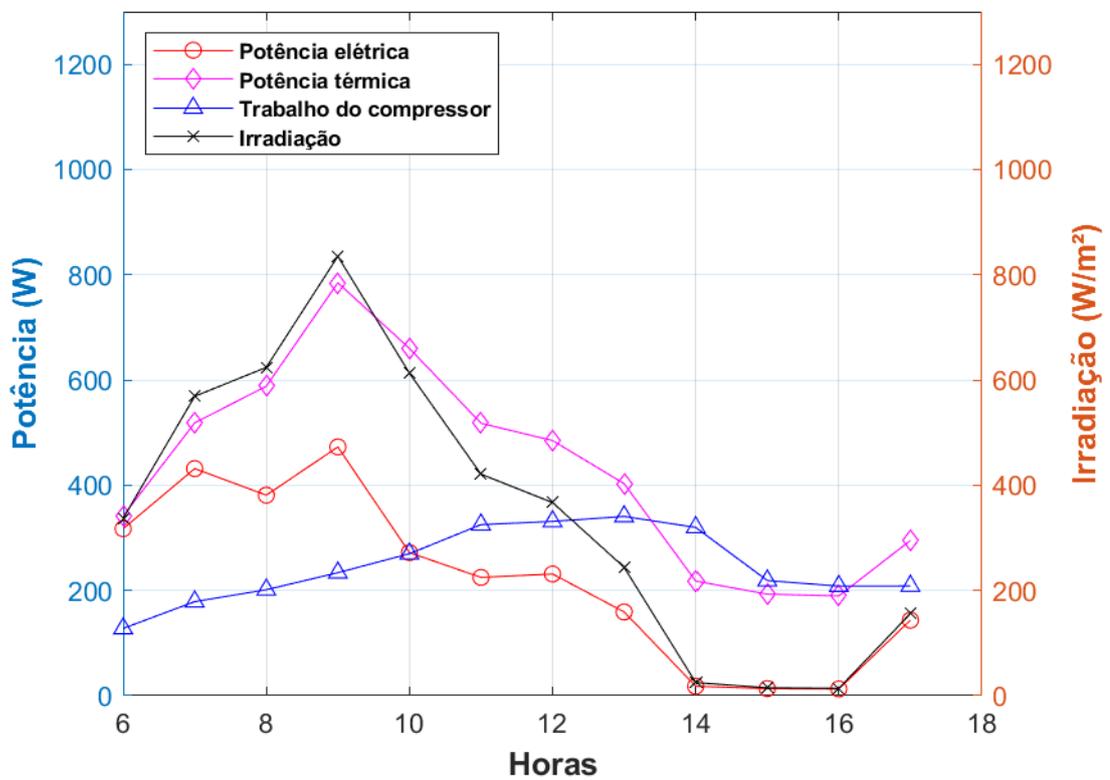


Figura 5.24 - Potências, Trabalho do compressor e irradiação solar PV-T com bomba de calor.

Começa a diminuir após o equinócio de setembro, e o ângulo do sol se torna mais baixo no céu. Isso resulta em uma redução na intensidade da luz solar incidente no painel fotovoltaico, levando a uma diminuição na eficiência do PV em comparação com o verão. No entanto, em dias claros, especialmente ao meio-dia, a eficiência do PV ainda pode ser relativamente alta. Quanto ao COP da bomba de calor, ele depende do diferencial de temperatura entre a fonte de calor e o local onde o calor é entregue. No outono, as temperaturas tendem a ser moderadas, o que pode permitir um COP relativamente alto, especialmente durante os períodos mais quentes do dia, conforme Figura 5.24.

A quantidade de luz solar é ainda menor devido à duração mais curta do dia e à posição mais baixa do sol no céu. Esses fatores resultam na menor eficiência do PV durante o ano. O COP da bomba de calor no inverno é influenciado pela necessidade de aquecimento. Como as bombas de calor extraem calor dos painéis fotovoltaicos, elas tendem a ser menos eficientes em temperaturas muito frias, resultando em um COP mais baixo, mostrado na Figura 5.25.

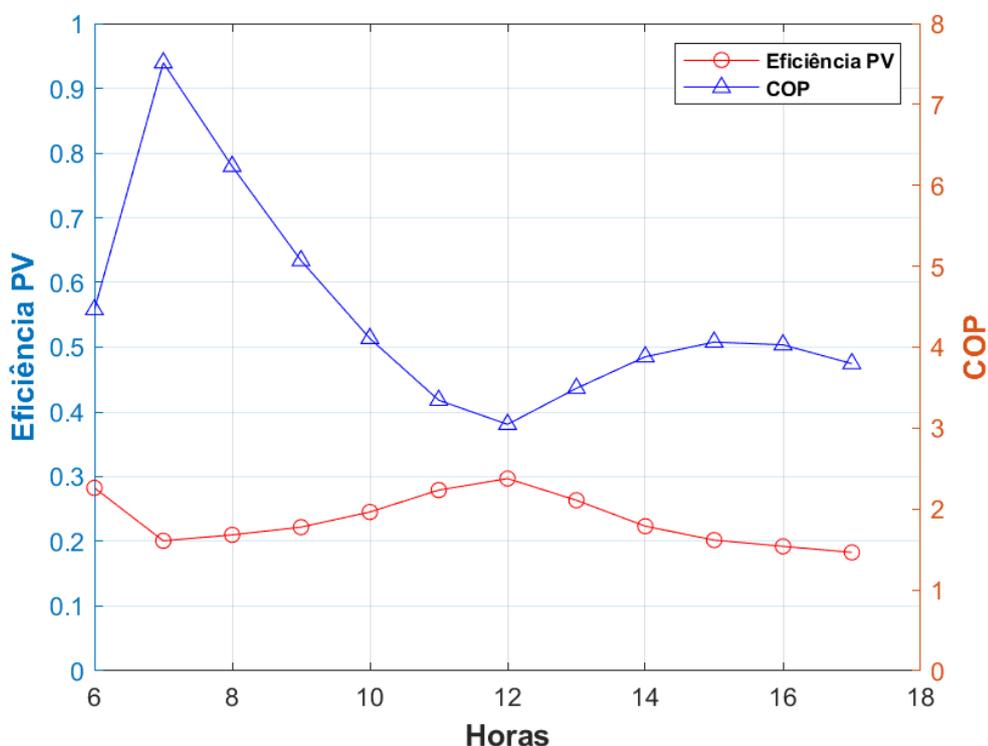


Figura 5.25 - Eficiência do PV e COP da PV-T com bomba de calor.

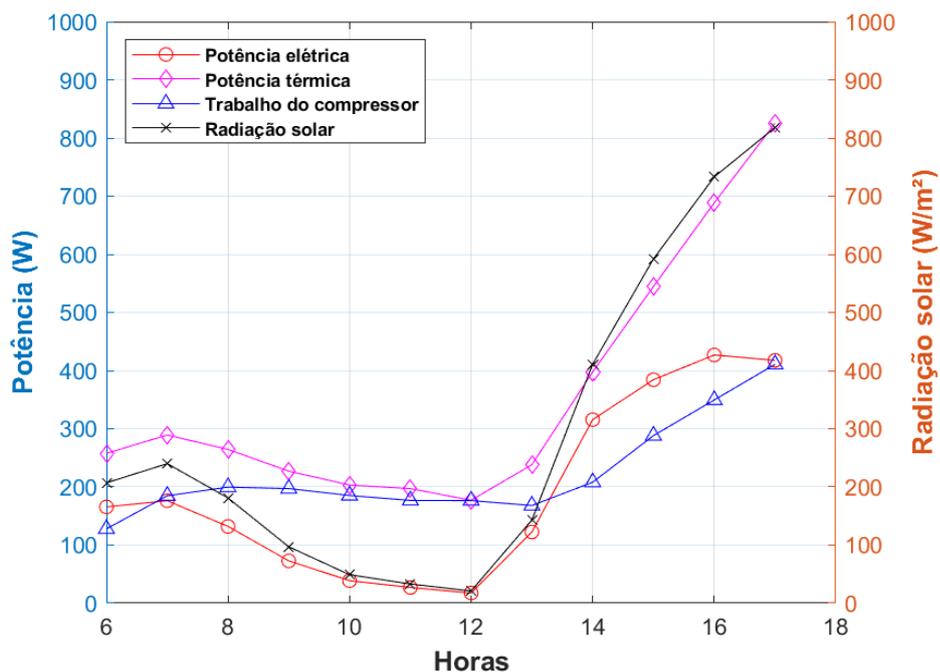


Figura 5.26 - Eficiência do PV e COP da PV-T com bomba de calor.

Com a duração da luz do dia e a posição do sol no céu aumentando gradualmente. Isso leva a um aumento na eficiência do PV em relação ao inverno. O COP da bomba de calor na primavera pode variar dependendo das temperaturas diurnas, que são geralmente moderadas. Durante os períodos mais quentes do dia, a bomba de calor pode operar com um COP relativamente alto, conforme Figura 5.27.

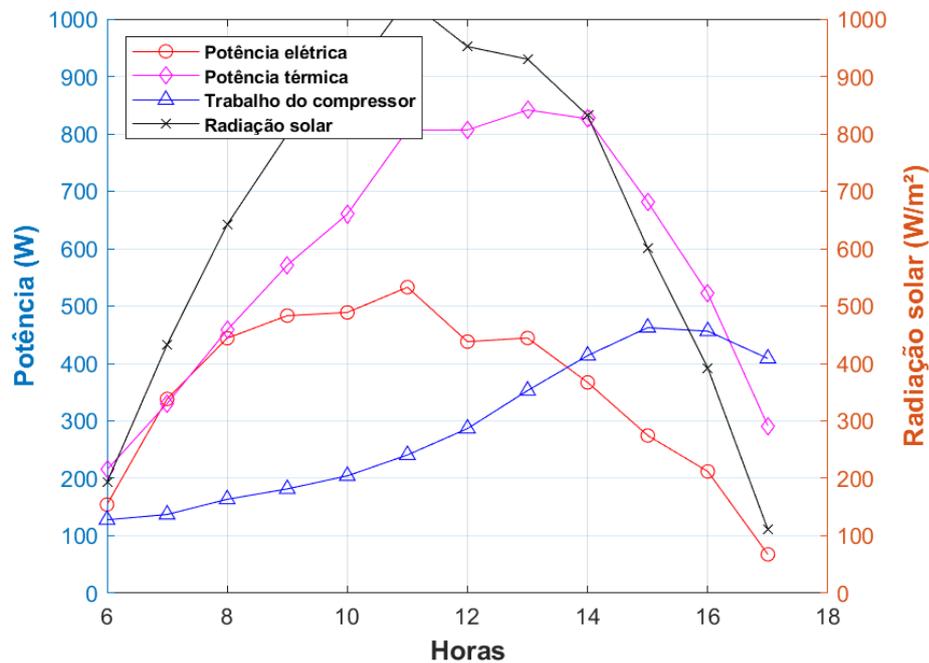


Figura 5.27 - Eficiência do PV e COP da PV-T com bomba de calor.

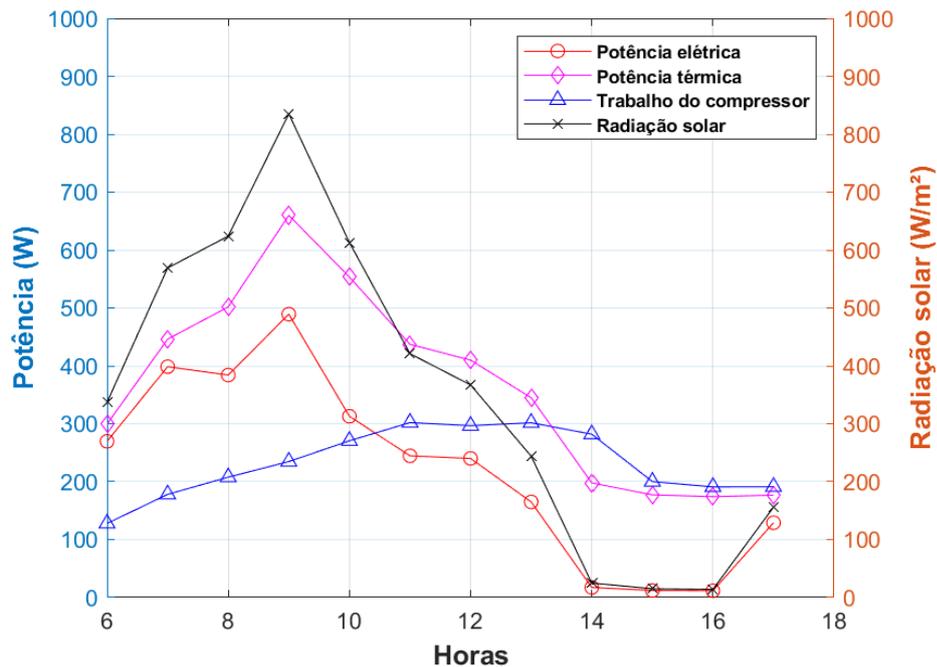


Figura 5.28 - Eficiência do PV e COP da PV-T com bomba de calor.

A duração da luz do dia é a mais longa e o sol está na posição mais alta no céu, levando à maior eficiência do PV durante o ano. No entanto, as temperaturas extremamente altas podem reduzir a eficiência do painel fotovoltaico devido ao aumento da resistência elétrica. O COP da bomba de calor no verão em determinado

período do dia inverter com a eficiência do painel, ou seja, o COP diminui e a eficiência aumenta, conforme gráfico 5.28.

Assim na tabela 5.4, é mostrado a média mensais e anuais no sistema PV-T com bombas de calor. Comparando as temperaturas do tanque do sistema AQS a vácuo, e do sistema proposto, observamos que a temperatura do tanque é maior que em sistemas AQS a vácuo, ou seja, aproximadamente 83,8% da temperatura no condensador fica dentro do tanque, e que a temperatura do painel fotovoltaico sem resfriamento tende a ser alta, assim, impactando na eficiência do painel, porém, quando há o sistema de resfriamento tende a eficiência aumentar.

Tabela 5.4 – Médias das temperatura do sistema PV-T com bomba de calor.

Mês	Temperatura Ambiente (°C)	Irradiação (W/m ²)	Temperatura do PV (°C)	Temperatura do evaporador (°C)	Temperatura do condensador (°C)	Temperatura final do tanque (°C)
Janeiro	25	457	15	12	51	41
Fevereiro	24	415	17	14	54	44
Março	24	414	18	15	59	49
Abril	23	429	19	16	58	49
Mai	21	384	13	10	50	41
Junho	19	388	20	16	54	44
Julho	19	422	19	15	57	47
Agosto	24	441	15	12	54	44
Setembro	25	399	14	12	54	45
Outubro	23	398	19	16	58	48
Novembro	24	494	12	9	50	41
Dezembro	24	413	13	11	50	40
Média Anual	23	421	16	13	54	45

A tabela 5.5, mostra que a um aumento significativa energia elétrica em comparação com sistemas de fotovoltaico, chega a ser de aproximadamente 8 vezes, ou seja, a energia gerada pelo sistema PV-T com bombas de calor é capaz de suprir o a energia consumida pelo compressor.

Tabela 5.5 - Médias de geração do sistema PV-T bomba de calor.

Mês	COP	Eficiência do PV	Energia elétrica (kWh)	Energia térmica (kWh)	Energia compressor (kWh)
Janeiro	4,89	27,44%	311	500	268
Fevereiro	4,79	29,46%	307	531	289
Março	4,45	31,07%	318	541	305
Abril	4,27	28,84%	308	583	324
Mai	4,39	31,42%	301	483	273
Junho	4,85	31,33%	325	606	302
Julho	4,68	28,72%	321	560	304
Agosto	4,55	30,33%	315	503	277
Setembro	4,28	30,96%	291	495	285
Outubro	4,69	29,64%	307	548	296
Novembro	4,49	29,37%	300	441	258
Dezembro	4,65	28,51%	322	456	261
Média anual	4,58	29,76%	310	521	287

5.5 Análise econômica

É apresentado uma análise econômica comparativa de três diferentes sistemas de geração de energia: um sistema PV-T (fotovoltaico-térmico) com bomba de calor, um sistema fotovoltaico On-grid (conectado à rede) e um sistema de aquecimento solar a vácuo.

Para os custos de cada sistema foram feitas cotação de preço em três empresas, nas quais foram informados os valores dos equipamentos e custo de manutenção, assim, foi feito um média nos preços levantado, tendo os valores obtidos na Tabela 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11.

O LCOE, ou Custo Nivelado de Energia, é uma medida do custo total, médio e efetivo de produzir energia a partir de uma determinada fonte. Ele é calculado somando todos os custos de capital, operacionais, de manutenção e de combustível ao longo da vida útil de um sistema, e dividindo esse total pela quantidade total de energia que o sistema produzirá durante sua vida útil. Em outras palavras, o LCOE representa o preço por unidade de energia que torna o valor presente líquido de um projeto igual a zero, levando em consideração a taxa de desconto.

Incluir o LCOE em uma análise econômica é importante porque oferece uma maneira de comparar o custo de diferentes tecnologias de geração de energia em uma base equitativa. Além disso, pode ajudar a identificar em que circunstâncias uma tecnologia específica, como um sistema PV-T com bombas de calor, se tornará economicamente viável.

A tabela 10 mostra os valores iniciais de cada sistema, esses valores de entrada representam diversas informações importantes para a implementação e operação de vários tipos de sistemas de energia. Primeiro, temos os custos iniciais ou o CAPEX, que é essencial para a instalação e ativação de cada sistema. Este custo pode incluir gastos com equipamento, instalação, engenharia, permissões, entre outros.

Além disso, temos os custos operacionais anuais de cada sistema. Estes custos envolvem a manutenção do sistema, a substituição de peças, o uso de energia, entre outros aspectos que impactam na operação contínua do sistema.

Outra entrada importante é a quantidade de energia que cada sistema é capaz de gerar anualmente. Esta é uma variável crítica, pois está diretamente ligada à eficiência do sistema e às condições locais, como a quantidade de luz solar disponível.

O preço de energia foi considerado o da concessionária CEMIG-D, escolhido a tarifa do grupo B, subgrupo B1 normal, além disso, foi considerado para o pior cenário, que é a tarifa vermelha 2, onde o preço da energia é de 0,8470 R\$/kWh, essa tarifa é aplicada quando está em período de escassez hídrica de chuva, assim, os reservatórios ficam abaixo do nível, não conseguindo gerar energia suficiente para a população, conforme tabela 5.6. A tabela 5.7, mostra as tarifas aplicada pela concessionária CEMIG-D, ao longo de 13 anos, assim, foi feito uma média para que possa ser analisado o LCOE de cada sistema, assim, o reajuste médio da tarifa para cada sistema será de 4% ao ano.

Tabela 5.6 - Tarifas CEMIG-D consumidor residencial normal (CEMIG-D, 2023)

BI- RESIDENCIAL NORMAL	BANDEIRA VERDE - CONSUMO R\$/KWH	BANDEIRA AMARELA - CONSUMO R\$/KWH	BANDEIRA VERMELHA 1 - CONSUMO R\$/KWH	BANDEIRA VERMELHA 2 - CONSUMO R\$/KWH
Residencial Normal (Consumo R\$/kWh)	0,74906	0,778950	0,814060	0,847010

Tabela 5.7 – Tarifas CEMIG-D ao longo dos 13 anos (ANEEL, 2023).

Ano temporal	Energia	Transmissão	Distribuição	Encargos	Outros
2011	3,03%	-0,53%	6,56%	2,92%	-2,53%
2012	3,00%	0,42%	3,23%	-1,62%	-1,18%
2013	5,88%	-3,23%	-11,40%	-4,61%	-0,79%
2014	10,48%	0,91%	5,11%	-0,85%	-1,41%
2015	8,23%	1,66%	0,16%	18,54%	0,00%
2016	-2,60%	-0,98%	2,68%	3,74%	1,37%
2017	0,84%	3,57%	-0,23%	-8,46%	-2,71%
2018	10,77%	1,65%	3,65%	1,19%	1,49%
2019	6,94%	-1,93%	1,53%	0,53%	0,00%
2020	0,06%	1,77%	0,63%	0,06%	-4,15%
2021	-3,93%	1,06%	0,98%	7,10%	-5,21%
2022	2,35%	1,14%	5,56%	3,36%	-6,73%
2023	1,59%	0,02%	1,17%	3,38%	8,53%

Por fim, também temos a vida útil esperada de cada sistema como uma entrada. Este é um dado valioso, pois define o período durante o qual o sistema irá funcionar eficazmente antes que precise de uma substituição significativa ou de reformas.

As Tabelas 5.8 a 5.10, descrevem o preço do CAPEX para cada sistema.

Tabela 5.8 – CAPEX sistema híbrido.

Sistema PV-T com bomba de calor			
Itens	Quantidade	Unid.	Valor
Painle FV 595 W	1	Unid.	R\$ 1.499,00
Controlador de carga	1	Unid.	R\$ 769,00
Inversor senoidal 1,5 kW	1	Unid.	R\$ 2.099,00
Medidor remoto	1	Unid.	R\$ 459,00
Bateria 150 Ah	1	Unid.	R\$ 1.249,00
Kit montagem	1	Unid.	R\$ 449,00
Frete	1	Unid.	R\$ 255,72
Serviço de Usinagem	1	Unid.	R\$ 7.000,00
Motobomba	1	Unid.	R\$ 299,77
Pasta térmica	1	Unid.	R\$ 269,00
Cobre	47	m	R\$ 791,00
Mão de obra	1	Unid.	R\$ 1.500,00
CAPEX			R\$ 16.639,49

Tabela 5.9 – CAPEX aquecedor solar a vácuo.

Sistema AQS a vácuo			
Itens	Quantidade	Unid.	Valor
Tubos acrílicos	36	Unid.	R\$ 7.696,00
Boiler 300 L	1	Unid.	R\$ 954,00
Kit de montagem	1	Unid.	R\$ 300,00
Fluido térmico	1	Unid.	R\$ 450,00
Mão de obra	1	Unid.	R\$ 1.000,00
CAPEX			R\$ 10.400,00

Tabela 5.10 – CAPEX sistema PV convencional.

Sistema PV			
Itens	Quantidade	Unid.	Valor
Painel FV 595 W	1	Unid.	R\$ 1.499,00
Micro-inversor 1 kW	1	Unid.	R\$ 2.000,00
Kit montagem	1	Unid.	R\$ 350,00
Instalador	1	Unid.	R\$ 1.500,00
CAPEX			R\$ 5.349,00

A Tabela 5.11, descrevem o preço do OPEX para cada sistema, o custo de operação é a energia anual multiplicado pelo preço da energia.

Tabela 5.11 – OPEX dos sistemas

Sistema PV-T com bomba de calor	
Itens	Preço
Manutenção	R\$ 600,00
Custo de Operação	R\$ 252,57
Total	R\$ 852,57
Sistema AQS a vácuo	
Itens	Preço
Manutenção	R\$ 1.300,00
Custo de Operação	R\$ 252,57
Total	R\$ 1.552,57
Sistema PV	
Itens	Preço
Manutenção	R\$ 600,00
Custo de Operação	R\$ 252,57
Total	R\$ 852,57

O LCOE é uma métrica que mede o custo médio de geração de energia para um sistema específico ao longo de sua vida útil. Essa métrica incorpora custos iniciais, operacionais, de manutenção, de combustível e leva em conta a quantidade de energia que o sistema consegue gerar. Assim, ela fornece uma maneira de comparar o custo relativo de diferentes sistemas de geração de energia, auxiliando na decisão de qual sistema adotar, conforme Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Preço do LCOE ao longo dos anos.

Sistema	Vida Util (anos)	LCOE (R\$/kWh)
PV-T com BC	25	R\$ 1,83
Sistema PV	25	R\$ 13,67
AQS a vácuo	25	R\$ 7,63

Observa que na Figura 5.29, quando o LCOE se aproxima do valor do preço da energia o sistema passa a ser viável, ou seja, um LCOE baixo significa que a tecnologia gera energia a um custo menor. Isso pode ser devido a custos iniciais mais baixos, custos operacionais mais baixos, uma vida útil mais longa ou uma maior produção de energia. A geração de energia do sistema PV-T com bomba de calor, por ser alta é o sistema mais viável economicamente.

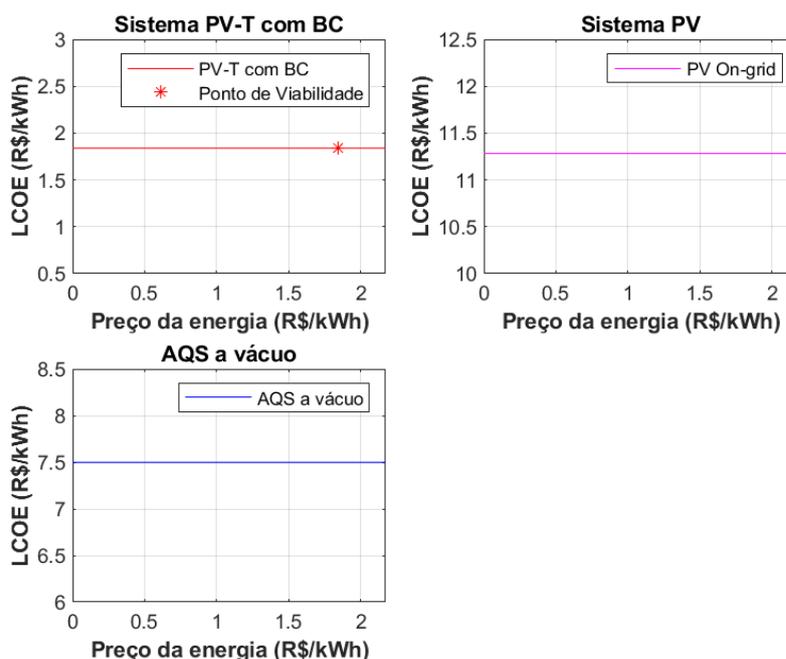


Figura 5.29 - Valor do LCOE para cada sistema.

5.6 Análise de cenários

A tabela 5.13 apresenta comparações de três cenários de sistemas de energia distintos. Cada cenário é analisado com base em quatro métricas: CAPEX (despesas de capital ou investimento inicial), OPEX (despesas operacionais), produção de energia elétrica e térmica (em kWh), e Custo Nivelado de Energia (LCOE) em R\$/kWh.

Tabela 5.13 – Análise de cenários

Sistema	CAPEX	OPEX	Energia elétrica e térmica (kWh)	LCOE (R\$/kWh)
Cenário 1 (PV-T com BC)	R\$ 16.639,49	R\$ 852,57	544	R\$ 2,79
Cenário 2 (Sistema PV + AQS a vácuo)	R\$ 15.749,00	R\$ 2.405,14	78	R\$ 38,91
Cenário 3 (PV + Chuveiro)	R\$ 5.499,00	R\$ 852,57	174	R\$ 6,16

Cenário 1 (PV-T com BC): Este sistema, que combina energia fotovoltaica e térmica com bomba de calor, o CAPEX indicando um investimento inicial de R\$16.639,49. O OPEX, que inclui custos como manutenção e operação, é de R\$852,57, um valor moderado em comparação com o cenário 2. A produção de energia elétrica e térmica é de 831 kWh, e a energia consumida pela bomba de calor é de 287 kWh, ou seja, o sistema PV-T com bomba de calor é capaz de produzir energia para a bomba de calor e ainda tem uma sobra de energia térmica e elétrica de 544 kWh, situando-se entre as produções dos outros cenários. Notavelmente, o LCOE é o mais baixo dos três (R\$2,79), o que indica que, apesar do alto investimento inicial, o custo médio por unidade de energia produzida é o mais baixo. Portanto, a longo prazo, este cenário pode proporcionar um bom retorno sobre o investimento.

Cenário 2 (PV + AQS a vácuo): Este cenário tem um CAPEX de R\$ 21.148,00 é o maior de todos os três cenários, mas apresenta o maior OPEX (R\$ 2.405,14). Apesar disso, é o que produz menos energia 78 kWh, e seu LCOE (R\$ 38,91) é o maior dos três cenários. Este cenário poderia ser protegido se a produção de energia para uma prioridade e os custos operacionais mais altos podem ser absorvidos, no entanto isso seria difícil, pois trata-se de dois equipamentos distintos, além disso esse cenário ocuparia uma maior área de ocupação em telhados.

Cenário 3 (PV +Chuveiro): Este cenário tem o menor CAPEX (R\$ 5.499,00) e OPEX (R\$ 852,57), produz uma quantidade de energia de 174 kWh. Notavelmente, o LCOE deste cenário é de R\$ 6,16. Isso sugere que, apesar do baixo custo inicial, o Cenário 3 não é tão eficiente quanto o Cenário 1 em termos de custo por unidade de energia produzida.

Em resumo, com base nos dados apresentados, o Cenário 1 (PV-T com BC) é o mais eficiente em termos de custo por unidade de energia produzida, seguido pelo Cenário 3 (PV + Chuveiro) e, por fim, pelo Cenário 2 (Sistema PV + AQS a vácuo).

6. CONCLUSÃO

Em conclusão, a presente dissertação analisou e comparou quatro tipos diferentes de sistemas de energia renovável: o PV-T com bomba de calor, o Sistema On-grid, o Sistema Off-grid e o Sistema de Aquecedor Solar a vácuo. Cada um desses sistemas oferece vantagens e desafios únicos, e a escolha do sistema mais adequado dependerá das necessidades específicas e das condições locais.

O sistema PV-T com bombas de calor, mostrou que com apenas um painel fotovoltaico acoplado a um evaporador e a utilização do fluido R134a, nas condições climáticas de Minas Gerais, é eficiente ao ponto de obter água quente durante todo dia, sem ter perda de calor no reservatório e produzir uma quantidade alta de energia elétrica ao ponto de suprir a energia consumida pelo compressor e ainda obter uma sobra de energia para uso doméstico. Além disso, o sistema é o que produz o LCOE mais baixo, assim, indica que a eletricidade gerada a partir de um sistema PV-T com bomba de calor pode competir com ou até mesmo superar o custo da eletricidade produzida por fontes convencionais, como combustíveis fósseis.

O Sistema On-grid por sua vez, mostrou que é não capaz de gerar com uma única placa energia suficiente para suprir a energia consumida pelo chuveiro, no então a sobra de energia não é suficiente para suprir a demanda restante da residência, e que essa energia que sobraria tornaria créditos, porém, dependendo do consumo da residência ainda teria que custear a conta de luz. Além disso, para que esse sistema se gere a mesma quantidade de energia que um sistema PV-T com bombas de calor, precisaria de aproximadamente 3 painéis fotovoltaico.

Já o sistema de Aquecimento solar a vácuo em comparação com o sistema PV-T com bomba de calor é extremamente inviável, primeiro por conta do custo dos sistemas, apesar do sistema de AQS a vácuo ser mais em conta que um sistema PV-T com bombas de calor, o custo da manutenção é maior, devido a sensibilidade do sistema a vácuo a condições climáticas adversas, como geadas ou granizo, os tubos vem a danificar. Além disso, o sistema apenas aquece a água, não gera energia elétrica, que ao contrário o sistema PV-T com bombas de calor gera água quente e eletricidade ao mesmo tempo.

REFERENCIAS

- ABNT NBR 15569:2008. Abnt nbr 15569: 2008. 2008.
- AMMAR, A A *et al.* Mathematical investigation on performance of photovoltaic (PV) combined with direct-expansion heat pump system (DX-SAHPS). *Researchgate.Net*, p. 279–283, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Bashir-Elhub/publication/342865937_Mathematical_investigation_on_performance_of_photovoltaic_PV_combined_with_direct-expansion_heat_pump_system_DX-SAHPS/links/5f0985bb92851c52d628e590/Mathematical-investigation-on-perf>.
- ANEEL. *Atlas da Energia Solar do Brasil*. Brasília: ANEEL.
- ANEEL. *Tarifas e Informações Econômico-Financeiras*.
- CEMIG-D. *VALORES DE TARIFAS E SERVIÇOS*.
- ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. *Termodinâmica 7ªed.* [S.l: s.n.], 2011.
- CHOW, T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, v. 87, n. 2, p. 365–379, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037>>.
- DECEASED, John A Duffie; BECKMAN, William A. *Solar engineering of thermal processes*. [S.l: s.n.], 2013. v. 3.
- DU, Boyao *et al.* Experimental study on the performance of a photovoltaic/thermal-air dual heat source direct-expansion heat pump. *Applied Thermal Engineering*, v. 188, 1 abr. 2021.
- DUBEY, Swapnil; SANDHU, G. S.; TIWARI, G. N. Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector. *Applied Energy*, v. 86, n. 5, p. 697–705, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.09.003>>.
- DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A.; MCGOWAN, Jon. *Solar Engineering of Thermal Processes* . [S.l: s.n.], 1985. v. 53.
- EPE. *Atlas de Energia Solar do Brasil*.
- EPE. *Perspectivas de Energia - Informe Anual 2021*. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/estudos-da-epe/perspectivas-de-energia-informe-anual-2021>>.
- HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, Merlin. Energia e Meio Ambiente. *Journal of Chemical Information and Modeling*, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2019.
- IBGE. *Pesquisa de informações básicas municipais: energia elétrica*.

INPE. *Monitoramento por satélite*.

JAMES, A. *et al.* Experimental studies on photovoltaic-thermal heat pump water heaters using variable frequency drive compressors. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 45, n. February, p. 101152, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101152>>.

LOSEKANN, Luciano; TAVARES, Felipe Botelho. Política energética no BRICS: desafios da transição energética. *Textos para discussão*, p. 60, 2019.

MDR. *No Title*. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/habitacao/casa-verde-e-amarela>>.

MME. Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro - Junho de 2021. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/energia-eletrica/boletins-mensais/boletim-mensal-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-brasileiro-junho-2021>>.

OBALANLEGE, Mustapha A. *et al.* Performance assessment of a hybrid photovoltaic-thermal and heat pump system for solar heating and electricity. *Renewable Energy*, v. 148, p. 558–572, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.061>>.

ÖZTÜRK, Müjdat; ÇALIŞIR, Oğuzhan; GENÇ, Gamze. Energy, exergy and economic (3E) evaluation of the photovoltaic/thermal collector-assisted heat pump domestic water heating system for different climatic regions in Turkey. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 145, n. 3, p. 1431–1443, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10973-021-10675-9>>.

PARIDA, Bhubaneswari; INIYAN, S.; GOIC, Ranko. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 3, p. 1625–1636, 2011a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>>.

PARIDA, Bhubaneswari; INIYAN, S.; GOIC, Ranko. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 3, p. 1625–1636, 2011b.

PRABHANJAN, Devanahalli G.; RENNIE, Timothy J.; RAGHAVAN, G. S.Vijaya. Natural convection heat transfer from helical coiled tubes. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 43, n. 4, p. 359–365, 2004.

PROCEL. *Cartilha da eficiência energética - Aprenda a economizar energia elétrica em sua casa*.

RAJ, N. Thilak; INIYAN, S.; GOIC, Ranko. A review of renewable energy based cogeneration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 8, p. 3640–3648, 2011.

SEZEN, Kutbay; GUNGOR, Afsin. Comparison of solar assisted heat pump systems for heating residences: A review. *Solar Energy*, v. 249, n. November 2022, p. 424–445, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.051>>.

SHAH, Mirza M. Comprehensive correlations for heat transfer during condensation in conventional and mini/micro channels in all orientations. *International Journal of Refrigeration*, v. 67, p. 22–41, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.03.014>>.

SHAH, Mirza M. Une corrélation unifiée pour le transfert de chaleur durant l'ébullition dans les mini/micro canaux lisses et standards. *International Journal of Refrigeration*, v. 74, p. 604–624, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.11.023>>.

SONG, Zhiying *et al.* Annual analysis of the photovoltaic direct-expansion heat pump assisted by double condensing equipment for secondary power generation. *Renewable Energy*, v. 209, n. March, p. 169–183, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.059>>.

VAISHAK, S.; BHALE, Purnanand V. Performance analysis of a heat pump-based photovoltaic/thermal (PV/T) system. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 23, n. 4, p. 1121–1133, 1 maio 2021.

VALENCIA-CAÑOLA, Santiago *et al.* Thermo-economical performance analysis of a direct-expansion solar heat-pump water heater driven by a photovoltaic array and the electrical grid in Medellín Colombia. *Applied Thermal Engineering*, v. 222, n. June 2022, 2023.

WANG, Gang *et al.* Experimental study on a novel PV/T air dual-heat-source composite heat pump hot water system. *Energy and Buildings*, v. 108, p. 175–184, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.016>>.

WILLS E WESTIN. Es W W Co M . D W Es. p. 6459, 2018.

ZHANG, Sheng *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*, v. 267, n. June, p. 115941, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115941>>.