INSTITUTO LATINO-AMERICAN DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUCTURA Y TERRITORIO (ILATIT)

INGENIERIA DE ENERGIAS

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE COLETORES SOLARES PLANOS E PARABÓLICOS NO TRNSYS

WASHINGTON ADRIAN REA QUILLE

Foz do Iguazú

2025

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUCTURA Y TERRITORIO (ILATIT)

INGENIERIA DE ENERGIAS

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE COLETORES SOLARES PLANOS E PARABÓLICOS NO TRNSYS

WASHINGTON ADRIAN REA QUILLE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.
Orientador: Prof. Dr. Gustavo Adolfo Ronceros Rivas

Foz do Iguazú

2025

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

WASHINGTON ADRIAN REA QUILLE

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE COLETORES SOLARES PLANOS E PARABÓLICOS NO TRNSYS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

BANCA EXAMINADORA

_____

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ronceros Rivas
UNILA

_____

Co-Orientador: Téc. Msc. Luciano Ari Fiamonzini
PPGIES-UNILA

_____

Prof. Dr. Ricardo Morel Hartmann
UNILA

_____

Prof. Dr. Washington Orlando Irrazabal Bohorquez
UFJF

Foz do Iguaçu, 12 de novembro de 2025.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais pelo amor, incentivo e apoio incondicional que sempre me deram.

Aos meus irmãos e irmãs, amigos e colegas de classe da universidade, por fazerem parte de minha formação pessoal.

Ao meu professor orientador, que confiou em mim e me acompanhou durante todo esse processo. Sua orientação e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À Unila e a todos os seus colaboradores, que me deram a oportunidade de ampliar meus conhecimentos ao longo de todos esses anos. Essa instituição me proporcionou não só conhecimentos fundamentais para minha carreira, mas também experiências que marcaram meu crescimento profissional e humano.

Gostaria de agradecer também a todos os professores, funcionários administrativos e colegas que fizeram parte desse processo acadêmico e contribuíram de diferentes formas para a realização deste trabalho.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Resumo

A crescente preocupação com os impactos ambientais da geração de energia a partir de fontes não renováveis reforça a busca por tecnologias mais eficientes e sustentáveis. Nesse contexto, a energia solar destaca-se por sua ampla disponibilidade e baixo impacto ambiental, podendo ser aproveitada na forma térmica e/ou elétrica. A energia fototérmica, foco deste estudo, converte a radiação solar em calor por meio de coletores solares, amplamente utilizados em diversas aplicações como sistemas de aquecimento de água, secagem, refrigeração, climatização de piscinas e até geração de vapor em processos industriais, dentre outros. No presente trabalho, a análise e comparação do desempenho térmico de coletores solares planos (FPC) e de coletores de calhas parabólicas (PTC) foram realizadas por meio de simulações realizadas no software TRNSYS, considerando as condições climáticas contrastantes das cidades de Foz do Iguaçu (PR) e Alvorada do Norte (GO). As simulações levaram em conta parâmetros geométricos, ópticos e termofísicos tanto do fluido de trabalho (água) quanto dos materiais constituintes dos coletores. As áreas de superfície consideradas na simulação da mesma foram de 1,824 m² para o FPC e 2,2 m² para o PTC. Os sistemas solares propostos neste trabalho (Layouts) e modelados no TRNSYS utilizam os componentes do tipo Type, sendo o tanque de armazenamento térmico (Type 4c), a bomba de recirculação de água (Type 3d), o controlador diferencial de temperatura (Type 2b), responsável pelo acionamento da bomba conforme a diferença térmica entre o coletor e o reservatório, e o coletor solar, modelado como FPC (Type 1b) e PTC (Type 1358), respectivamente. Os resultados da validação para o FPC, mostram uma boa aproximação com os dados experimentais, obtendo-se um erro médio de 5 % para o FPC e um erro de 6,35% para o sistema de coletor parabólico PTC. Dessa forma, o modelo computacional desenvolvido foi validado, demonstrando sua capacidade de representar adequadamente o comportamento térmico dos coletores solares analisados. Além disso, os sistemas propostos mostram eficiências medias anuais de 47,46 e 43,27% para o FPC e o PTC, respectivamente, em Foz do Iguaçu; e de 58,47% e 41,31 % para os mesmos coletores na cidade de Alvorada do Norte. Finalmente, os resultados obtidos para o PTC de pequeno porte não concordam, devido que a simulação foi realizado sem tracking, e não representam de forma fiel o comportamento físico esperado.

Palavras-chaves: Simulação em TRNSYS, Coletores de placa plana, Coletores de calha parabólica, Simulação de sistemas, Eficiência térmica.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Resumen

La creciente preocupación por los impactos ambientales de la generación de energía a partir de la fuente no renovables refuerza la búsqueda de tecnologías más eficientes y sostenibles. En este contexto, la energía solar destaca por su amplia disponibilidad y bajo impacto ambiental, pudiendo ser aprovechada en forma térmica y/o eléctrica. La energía fototérmica, foco de este estudio convierte la radiación solar en calor mediante colectores solares, ampliamente utilizados en diversas aplicaciones como sistemas de calentamiento de agua, secado, refrigeración, climatización de piscinas e incluso generación de vapor en procesos industriales, entre otros. En el presente trabajo, el análisis y la comparación del rendimiento térmico de colectores solares planos (FPC) y de colectores de canal parabólicos (PTC) se realizaron mediante simulaciones realizadas en el software TRNSYS, considerando las condiciones climáticas contrastantes de las ciudades de Foz do Iguazú (PR) y Alvorada do Norte (GO). Las simulaciones tuvieron en cuenta los parámetros geométricos, ópticos y termo físicos tanto del fluido de trabajo (agua) como de los materiales constituyentes de los colectores. Las áreas de superficie consideradas en la simulación fueron de 1,824 m² para el FPC y 2,2 m² para el PTC. Los sistemas solares propuestos en este trabajo (diseños) y modelados en TRNSYS utilizan componentes del tipo Type, siendo el tanque de almacenamiento térmico (Type 4c), la bomba de recirculación de agua (Type 3d), el controlador diferencial de temperatura (Type 2b), responsable de accionar la bomba según la diferencia térmica entre el colector y el tanque, y el colector solar, modelado como FPC (Type 1b) y PTC (Type 358), respectivamente. Los resultados de la validación para le FPC muestran una buena aproximación con los datos experimentales, obteniéndose un error medio del 5% y un error del 6,35% para el sistema de colector parabólico PTC. De esta manera, el modelo computacional desarrollado fue validado, demostrando su capacidad para representar adecuadamente el comportamiento térmico de los colectores solares analizados. Además, los sistemas propuestos muestran eficiencias medias anuales del 47,46% y 43,2% para el FPC y el PTC, respectivamente, en Foz do Iguazú; y del 58,47% y 41,31% para los mismos colectores en la ciudad de Alvorada do Norte. Finalmente, los resultados obtenidos no coinciden, debido a que la simulación se realizo sin seguimiento (tracking) y, por lo tanto, no representan fielmente el comportamiento físico esperado.

Palabras claves: Simulación en TRNSYS, Colectores de placa plana, Colector parabólico, Simulación del sistema, Eficiencia térmica.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

ABSTRACT

The growing concern about the environmental impacts of energy generation from non-renewable sources reinforces the search for more efficient and sustainable technologies. In this context, solar energy stands out for its wide availability and low environmental impact, being able to be harnessed in thermal and/or electrical form. Photothermal energy, the focus of this study, converts solar radiation into heat through solar collectors, widely used in various applications such as water heating systems, drying, refrigeration, pool climate control, and even steam generation in industrial processes, among others. In the present work, the analysis and comparison of the thermal performance of flat plate solar collectors (FPC) and parabolic trough collectors (PTC) were carried out thru simulations conducted using the TRNSYS software, considering the contrasting climatic conditions of the cities of Foz do Iguaçu (PR) and Alvorada do Norte (GO). The simulations considered geometric, optical, and thermophysical parameters of both the working fluid (water) and the materials constituting the collectors. The surface areas considered in the simulation were 1.824 m² for the FPC and 2.2 m² for the PTC. The solar systems proposed in this work (Layouts) and modeled in TRNSYS use Type components, with the thermal storage tank (Type 4c), the water recirculation pump (Type 3d), the differential temperature controller (Type 2b), responsible for activating the pump according to the temperature difference between the collector and the reservoir, and the solar collector, modeled as FPC (Type 1b) and PTC (Type 1358), respectively. The validation results for the FPC show good approximation with the experimental data, achieving an average error of 5% and an error of 6.35% for the PTC parabolic collector system. Thus, the developed computational model was validated, demonstrating its ability to adequately represent the thermal behavior of the analyzed solar collectors. Furthermore, the proposed systems show average annual efficiencies of 47.46% and 43.27% for the FPC and PTC, respectively, in Foz do Iguaçu; and 58.47% and 41.31% for the same collectors in the city of Alvorada do Norte. Finally, the results obtained for the small-scale PTC do not coincide, because the simulation was carried out without tracking, and therefore do not accurately represent the expected physical behavior.

Keywords: Simulation in TRNSYS, Flat plate collectors, Parabolic collectors, System simulation, Thermal efficiency.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relação entre temperatura e relação de concentração para diferente. 15
Figura 2: Tipos de coletores solares. 26
Figura 3: Diagrama esquemático de coletor solar do tipo placa plana. 27
Figura 4: Coletor de calhas parabólicas (PTC). 29
Figura 5: Balance energético do coletor de placa plana e parabólico em calha. 30
Figura 6: Sistema solar proposto ou Layout a ser simulado no software TRNSYS. 32
Figura 7: Diagrama do modelo de tanque TYPE4C. 33
Figura 8: Fluxo entre Segmentos. 34
Figura 9: Função Controladora. 35
Figura 10: Modelo geral dos coletores gerados no TRNSYS a) FPC e b) PTC. 40
Figura 11: Diagrama de fluxo da metodologia utilizando o TRNSYS. 41
Figura 12: Simulação de sistema em TRNSYS. 42
Figura 13: Simulação de sistema em TRNSYS. 42
Figura 14: Simulação de sistema em TRNSYS. 43
Figura 15: Simulação de sistema em TRNSYS. 43
Figura 16: Validação da simulação no TRNSYS da cidade de Cuenca-Equador. 45
Figura 17: Resultados das temperaturas vs meses. 47
Figura 18: Resultados da Radiação vs meses. 48
Figura 19: Resultados da eficiência vs meses. 48
Figura 20: Resultados das temperaturas vs meses. 51
Figura 21: Resultados da Radiação vs meses. 52
Figura 22: Resultados da eficiência vs meses. 52
Figura 23: Simulação de sistema em TRNSYS. 53
Figura 24: Simulação de sistema em TRNSYS. 53
Figura 25: Resultados das temperaturas vs meses. 57
Figura 26: Resultados DNI vs meses. 58
Figura 27: Resultados da eficiência vs meses. 58
Figura 28: Resultados das temperaturas vs meses. 61
Figura 29: Resultados DNI vs meses. 62
Figura 30: Resultados da eficiência vs meses. 62

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sistemas de Energia Solar. 16
Tabela 2: Parâmetros de especificação de bomba de circulação de água. 35
Tabela 3: Parâmetros do coletor solar placa plana com tubo normal. 36
Tabela 4: Parâmetros geométricos do PTC..... 38
Tabela 5: Resultado da validação do coletor de placa plana com tubo. 44
Tabela 6: Resultados da simulação no TRNSYS da cidade de Foz do Iguazú. 46
Tabela 7: : Resultados da simulação no TRNSYS da cidade de Alvorada do Norte. 50
Tabela 8: Resultado da validação do protótipo (Fiamonzini)..... 54
Tabela 9: Comparação de rendimento térmico entre diferentes coletores. 54
Tabela 10: Resultados da simulação no TRNSYS da cidade de Foz do Iguaçu. 56
Tabela 11: Resultados da simulação no TRNSYS da cidade de Alvorada do Norte. 60

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

LISTA DE SIMBOLOS

A	Area do coletor (m^2)
A_a	Area de abertura do coletor (m^2)
A_r	Area do tubo absorvedor (m^2)
C	Fator de concentração geométrico
C_{pf}	Calor específico do fluido (J/Kg*K)
f_{nuvem}	fator de nebulosidade
F	Fator de eficiência do coletor
F_R	Fator de remoção
I_T	Radiação solar total (W/m^2)
I_b	Radiação solar direta (W/m^2)
$\dot{m}$	Vazão mássica (kg/s)
Q_u	Calor útil do coletor (W)
U_L	Coeficiente de perdas térmicas ($W/m^2 * K$)
$U_{L/T}$	Dependência do coeficiente de perda térmica em relação a T ($W/m^2 * K$)
T_a	Temperatura ambiente (°C)
T_{ceu}	Temperatura efetiva do céu (°C)
T_i	Temperatura de entrada do coletor (°C)
T_o	Temperatura de saída do coletor (°C)
η	Eficiência do coletor
η_t	Eficiência teórica
η_0	Eficiência experimenta
β	Inclinação do coletor acima do plano horizontal (°)
$(\tau\alpha)$	Produto da transmitância da cobertura e da absorbância do absorvedor
$(\tau\alpha)_b$	Para radiação de feixe (depende do ângulo de incidência θ)
$(\tau\alpha)_g$	Para radiação refletida pelo solo
$(\tau\alpha)_n$	Incidência normal
$(\tau\alpha)_S$	Para radiação difusa do céu
θ	Ângulo de incidência para radiação de feixe (°)
θ_{ceu}	Ângulo de incidência efetivos para a radiação difusa do céu (°)
θ_{gnd}	Ângulo de incidência efetivos para a radiação refletida pelo solo (°)
$\in_{ceu}$	Emissividade efetiva de um céu

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

CFD Dinâmica dos fluidos computacional

FPC Coletor de placa plana

FTC Fluido de transpor de calor

IAM Modificador do ângulo de incidência

POLYSUN Energy Modeling Software for Efficient Energy System Design

PTC Coletor solara de calha parabólica

SAM System Advisor Model

TES Thermal Energy Storage

TRNSYS Transient System Simulation Tool

WATSUN Waterloo Solar Energy Simulation

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

INDICE

1. INTRODUÇÃO 14
1.1 Objetivos 18
1.1.1 Objetivo geral 18
1.1.2 Objetivos específicos 18
1.2 Justificativa E Relevância Da Pesquisa 19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 21
2.1. Energia Solar 21
2.2 Termodinâmica 22
2.3. Radiação 23
2.4. Convecção 23
2.5 Condução 24
2.6 Coletores Solares 25
2.6.1 Coletor de placa plana 27
2.6.2 Coletor solar de calha parabólica 28
2.7 Eficiência Térmica 30
3. METODOLOGIA 31
3.1 Sistema Base Proposto para a Simulação no TRNSYS 31
3.2 Descrição dos Types 33
3.2.1 Type do tanque estratificado 33
3.2.2 Type do controlador diferencial 34
3.2.3 Type da Bomba de circulação 35
3.2.4 Modelo de coletor solar de placa plana com tubos normal 36
3.2.5 Modificador de ângulo de incidência (IAM) 37
3.2.6 Modelo de coletor solar de tipo calha parabólico PTC 37
3.2.7 Modelo de temperatura do céu. 39
3.3 Avaliação do sistema solar no TRNSYS 39
4. DESCRIÇÃO DE RESULTADOS 42
4.1 Validação sistema do coletor de placa plana 44
4.1.2 Resultados do caso estudo do sistema do coletor solar de placa plana (FPC) 45
4.2 Simulação do sistema do coletor calha parabólica (PTC) 53
4.2.1 Validação para o protótipo PTC de pequeno porte 54
4.2.2 Resultados do caso estudo do sistema de coletor solar de tipo calha parabólico (PTC) 55
5. CONCLUSÃO 63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 66

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

ANEXOS 70

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

1. INTRODUÇÃO

As principais atividades humanas, como transporte, iluminação, calefação, refrigeração e processos industriais, consomem grandes quantidades de energia, sendo estas basicamente provenientes de energias não renováveis, como carvão, petróleo e gás natural. No entanto, o uso indiscriminado desses recursos tem causado sérios danos e impactos ao meio ambiente. Nesse cenário, a crescente preocupação mundial com as mudanças climáticas, aliada à busca por segurança energética, tem impulsionado a transição energética para fontes de energia limpas e renováveis (GARRUÇO, 2022).

Entre essas fontes de energia renovável, a energia solar assume papel de destaque, não apenas pela sua abundância, mas também pelo seu expressivo potencial em contribuir para o fornecimento da demanda energética mundial de forma sustentável.

A energia solar pode ser aproveitada de diversas formas, sendo a fotovoltaica e energia solar foto térmica (ou concentradores solares) as principais. A energia fotovoltaica converte a luz solar em eletricidade de forma direta sem nenhuma conversão intermediaria. Já que é produzida por geradores fotovoltaicos compostos por módulos interconectados que, por sua vez, são compostos por unidades básicas chamadas células solares ou fotovoltaicas. A energia foto térmica, foco deste estudo, converte a radiação solar em calor mediante seu dispositivo principal, o coletor solar. Amplamente utilizados em diversas aplicações, como aquecedores de água, secagem, refrigeração, climatização de piscinas e até geração de vapor em processos industriais, dentre outros. Em resumo, ambas tecnologias fotovoltaicas e foto térmica, desempenham papéis cruciais na construção da matriz energética (NAVUNGO ET AL., 2024; DA SILVA ET AL., 2022).

Contudo, maiores investimentos em P&D precisarão ser realizadas nos seus diversos subsistemas, tais como, tecnologias de captação, armazenamento e conversão. Deixando os custos mais competitivos e avanços tecnológicos mais eficientes e acessíveis (ABNT, 2020; JÚNIOR; LIMA, 2023; KALOGIROU, 2004; CAETANO ET AL., 2023).

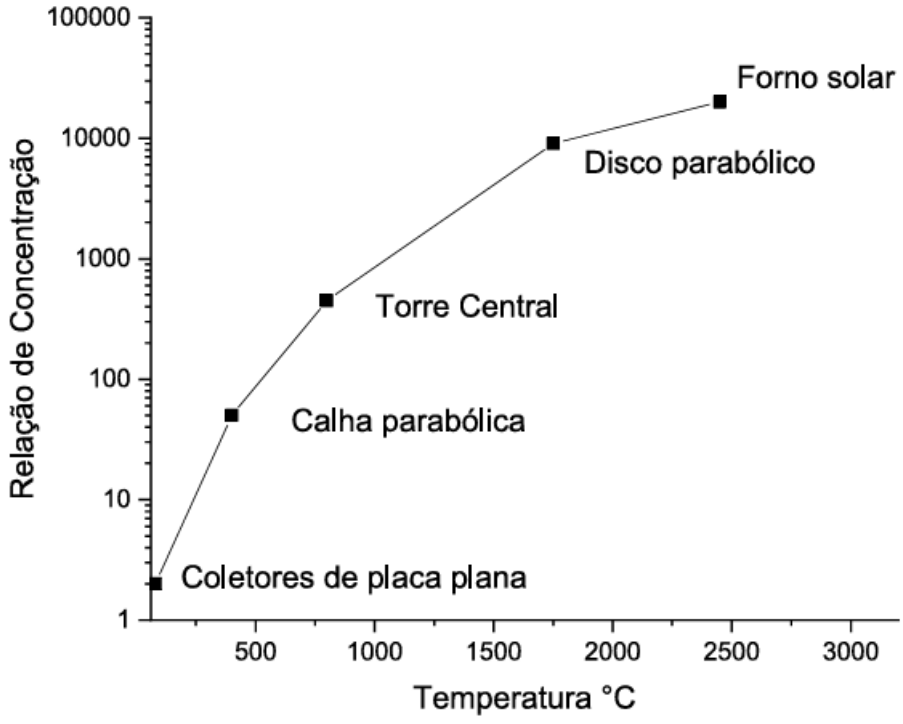
Os coletores solares, dispositivos de aproveitamento térmico são projetados para absorver a radiação solar e transferir o calor para um fluido de trabalho (água, óleo, nano fluidos, dentre outros). Estes se classificam em, sem concentração, como os de placa plana sem e com tubos evacuados; e de concentração, como aqueles que interatuam nos sistemas de calhas parabólicas (PTC), torre central e fornos solares. Quanto aos coletores solares de concentração, estes podem ser subdivididos em sistemas de baixa, média e alta concentração. Importa salientar

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

que os coletores parabólicos cilíndricos (PTC) são particularmente adequados para operar nas faixas de baixa e média temperatura, encontrando aplicações em processos como aquecimento, dessalinização de água, refrigeração por absorção, geração de vapor industrial e produção de energia elétrica (KALOGIROU, 2004).

Embora os coletores de placa plana sejam simples e de baixo custo, ideais para baixas temperaturas trabalhando em uma faixa de operação entre 40ºC e 65ºC, sua eficiência diminui em condições adversas. Diante deste problema, aparece o coletor plano de tubo evacuado, oferecendo maiores eficiências em climas frios devido ao vácuo isolante (SCHNEIDER, 2022; MIGUEL, 2021). Já, os PTCs conforme descrito anteriormente, são capazes de operar em faixas de baixas e médias temperaturas, aproximadamente de 60°C a 600°C em diversas aplicações. Apresentando, algumas vezes sistemas de rastreamento (tracking) na sua configuração, com a finalidade de aumentar sua eficiência. Sem embargo, geralmente aumentam sua complexidade e elevam os custos no sistema (BUONOMANO ET AL., 2018). A figura 1 mostras as diversas tecnologias e a ampla faixa de concentração dos possíveis sistemas solares concentrados que operam em uma ampla faixa de temperatura.

Figura 1: Relação entre temperatura e relação de concentração para diferentes tecnologias.



Fonte: Adaptado de (SUMAN, KHAN, et al.,2015)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Além disso, a tabela 1 mostra os sistemas de energia solar com suas principais caraterísticas.

Tabela 1: Sistemas de Energia Solar.

Principais Sistemas de Energia Solar				
Movimento	**Tipo do coletor**	**Tipo do absorvedor**	**Razão de concentração**	**Intervalo de Temperatura indicativo (°C)**
Estacionário	Coletor de placa plana (FPC)	Plano	1	30-80
Rastreamento de eixo único	Coletor parabólico em calha (PTC)	Tubular	10-85	60-400

Fonte: Adaptado de Kalogirou.(2016)

Cabe ressaltar, que na otimização e desempenho desses coletores, é fundamental entender e compreender os principais modos da transferência de calor, isto é, condução, convecção e radiação; assim como os princípios termodinâmicos que governam a conversão e perdas de energia nas suas configurações (CAVALCANTE, 2023; MIGUEL, 2021; OLIVEIRA, 2025). Podendo assim quantificar sua eficiência térmica, parâmetros críticos influenciados por diversos fatores como a irradiação solar, a temperatura ambiente, a velocidade do vento e as propriedades termo físicas e óticas dos materiais absorvedores e isolantes (KALOGIROU, 2004; COSTA, 2022).

Diversos estudos têm sido realizados sobre coletores solares, englobando tanto análises experimentais quanto numéricas. No que respeita à análise computacional, é importante mencionar alguns softwares em sistemas solares que trabalham com coletores como SAM (System Advisor Model), TRNSYS (Transient System Simulation Tool), WATSUN (Waterloo Solar Energy Simulation), POLYSUN, dentre outros. Essenciais na simulação, construção e desempenho de sistemas, ajudando na minimização das perdas e maximizando a captação de energia (SCHNEIDER, 2022; KALOGIROU, 2004).

Azad (2008) e Taherian eta. (2010), Chien eta al. (2010), Redpath (2011), Carbonell et al. (2013) realizaram estudos com coletores solares assistidos por termos sifões para avaliar seu desempenho, confrontando os resultados teóricos com os experimentais. Redpath (2011) estudou ainda a redução dos custos associados a esses dispositivos. Os resultados alcançados pelos autores se mostraram de acordo com o modelo teórico, apresentando pequenas variações.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Tiwari et al. (2020) modelaram um sistema de aquecimento de água doméstica no TRNSYS para as condições climáticas da Índia. Mostrando como resultado, temperaturas médias do coletor de 63°C, e a eficiência diária do coletor manteve-se na faixa de 55% a 65%. A temperatura média armazenada no tanque varia entre 45° e 65°C ao utilizar um coletor de placa plana.

Hill e Streed (1976), Abdel-Khalik (1976), Woodman (1977) e Sieberst e Viskanta (1977) desenvolveram estudos teóricos-experimentais para determinar o rendimento de coletores solares plano. Testes experimentais e simulações computacionais foram realizadas nessas análises. Os resultados obtidos indicam que a maioria dos testes teóricos apresenta uma boa precisão em relação aos testes experimentais.

Fiamonzini (2022), desenvolveu um protótipo de concentrador solar tipo calha parabólico (CSCP) sem tubo evacuado de baixo custo para fins didáticos e de pesquisa. Onde ele avaliou a eficiência do coletor para diferentes temperaturas, na faixa de 30 a 70 °C, com uma vazão fixa de 0.020 kg/s. No segundo caso avalio a eficiência do coletor para diferentes vazões mássicas de 0.002 a 0.030 kg/s, onde obteve uma eficiência do coletor de 0.32% em função da temperatura.

Leiva (2022) realizo um estudo de um coletor solar de cilindro parabólico para aplicações em refrigeração por absorção utilizando técnicas de dinâmica dos fluidos computacional ®Ansys CFD. Esse estudo foi realizado em um protótipo experimental de pequeno porte (EPP), proposto por Fiamonzini (2022), uma vez validado, projetou virtualmente vários tubos de vidros evacuados de forma concêntrica mostrando resultados de maiores ganhos de temperaturas e eficiências, aproveitando a verdadeira potencialidade da simulação numérica.

Apesar dos avanços tecnológicos e da crescente demanda por energia limpa, a complexidade associada ao projeto, à otimização e à operação de sistemas solares, em especial nos coletores solares térmicos, ainda constitui um desafio tecnológico e acadêmico para a difusão do conhecimento e para a formação de profissionais qualificados nas áreas de engenharia e ciências. Diante desse cenário, o presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como objetivo realizar uma simulação e validação de coletores solares plano e parabólico, utilizando o software TRNSYS, para aplicações rurais. A futuro por meio desse estudo também pretende-se implementar uma bancada didática.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral consiste em analisar e comparar o desempenho térmico de coletores solares plano e parabólico mediante uso do software TRNSYS.

1.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar e descrever a formulação teórica e numérica dos principais componentes do sistema solar proposto, coletores solares de placa plana e calha parabólica, armazenadores de calor, bomba, controladores etc.;
- Analisar e comparar os resultados obtidos na simulação numérica via TRNSYS 18, com os resultados experimentais encontrados na literatura;
- Simular o desempenho térmico do sistema proposto em diferentes condições de irradiação solar e temperatura ambiente utilizando o software computacional;
- Fornecer subsídios técnicos e acadêmicos que possam contribuir para o dimensionamento e aplicações rurais para uma pequena família e para uma bancada didática.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

1.2 Justificativa E Relevância Da Pesquisa

A crescente demanda por energias limpas e renováveis, atrelada às preocupações com as mudanças climáticas e segurança energética, confere urgência e estudos sobre o desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento solar. Dentro desse panorama, os coletores solares destacam-se por sua capacidade de atingir baixas, médias e altas temperaturas, tornando-os versáteis para inúmeras aplicações. No que concerne a baixas temperaturas, aplicações de grande interesse seria na geração de calor para processos industriais e residenciais; em áreas rurais, poderia atender demandas como aquecimento de água para uso doméstico, agroindústrias, secagem de produtos agrícolas e outras necessidades térmicas locais, de forma sustentável e com baixo custo operacional. A academia, sendo um componente essencial da sociedade, exerce um papel crucial nesse contexto por meio de pesquisa e desenvolvimento (P&D). Por exemplo, criando soluções inovadoras, melhorando eficiências de coletores solares e fomentando sua acessibilidade. E conforme mencionado anteriormente, através de pesquisas, protótipos e colaborações com a indústria e comunidades, as instituições acadêmicas promovem a transição para uma matriz energética mais sustentável, em consonância com os objetivos de sustentabilidade e inclusão social, principalmente em áreas onde o acesso a tecnologias energéticas moderna ainda é limitado.

No que respeita à disponibilidade de implementação e projetos de bancada experimentais, muitas vezes são limitadas devido aos altos custos de aquisição e manutenção, bem como à complexidade de operação. Nesse contexto, a proposta de uma simulação computacional de uma bancada didática que utilize diversos coletores solares ganha grande versatilidade acadêmica, no que concerne ao apoio e à implementação de laboratórios relacionados com a pesquisa proposta. Assim, massifica-se o acesso ao conhecimento prático sobre coletores solares e suas interdisciplinaridades, tais como termodinâmica, mecânica dos fluidos, transferência de calor, sistemas de energia solar e simulação computacional, aprimorando a formação de futuros profissionais das áreas de energias renováveis, engenharia térmica e fluidodinâmica.

Assim, para o presente projeto, a simulação numérica oferece uma alternativa acessível, permitindo que estudantes e pesquisadores explorem diferentes cenários operacionais, parâmetros de projeto e condições climáticas sem as restrições impostas por um laboratório físico. No entanto, para que a simulação numérica atinja todo o seu potencial, é fundamental validar rigorosamente os modelos, assegurando a confiabilidade dos resultados. A relevância desse processo é bastante abordada na literatura, como no livro Kalogirou 2004, Duffie e

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Beckman 1991, destacando a importância de validar simulações numéricas para garantir a exatidão em modelagens térmicas e fluidodinâmicas, fornecendo um suporte teórico solido para o avanço de tecnologias como coletores solares.

O software utilizado no presente trabalho foi o TRNSYS, ferramenta consolidada para a modelagem transiente de sistemas térmicos e fluidos, e a simulação de um cenário didático que pode refinar a compreensão dos principais modos da transferência de calor em condições controladas virtualmente. Além disso, a capacidade de testar diferentes configurações de forma rápida e segura sem os custos e riscos associados a experimentos físicos caros e demorados, pode gerar *insights* valiosos para o desenvolvimento de novos desenhos de coletores e estratégias de otimização de desempenho, contribuindo para o avanço do conhecimento científico na área de energia solar, conforme discutido por Kalogirou (2009) e Sosa et.al. (2020).

O projeto visa simplificar a aprendizagem e disseminar o conhecimento sobre uma tecnologia de energia limpa. Isso facilita a capacitação de mão de obra e o treinamento de profissionais que poderão atuar no desenvolvimento e implementação de sistemas solares da área proposta, seja em aplicações de pequeno ou mediano porte. Finalmente, em um cenário global a busca pela sustentabilidade e redução da dependência de combustíveis fósseis; a democratização do acesso ao entendimento de tecnologias como coletores planos e PTCs é de suma importância para impulsionar a adoção de energias renováveis e contribuir para o desenvolvimento de comunidades e cidades mais autossuficientes e ambientalmente conscientes (IEA, 2023; ONU, 2022).

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção aborda os principais conceitos relacionados à energia solar e aos fenômenos térmicos e fluidodinâmicos associados à operação de coletores solares. O foco recai sobre os dois tipos de coletores de baixa temperatura analisados trabalho. Adicionalmente, realiza-se uma revisão bibliográfica sucinta das principais teorias apresentadas por autores de referência na área, visando aprofundar a compreensão do tema e fundamentar o cumprimento dos objetivos propostos.

2.1. ENERGIA SOLAR

A energia solar se destaca como a fonte de energia mais abundante e limpa disponível no planeta, tendo sua origem na radiação eletromagnética contínua emitida pelo Sol. Seu aproveitamento, tanto para fins térmicos quanto elétricos, é reconhecido como uma estratégia central e indispensável para a transição energética global (KALOGIROU, 2004).

Essa disponibilidade solar justifica plenamente o crescente volume de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e implementação de tecnologias de captação e conversão solar. Entre essas tecnologias, destacam-se os coletores solares térmicos que transformam a radiação solar diretamente em calor para diversas aplicações (KALOGIROU, 2004; CAETANO ET AL., 2023).

No entanto, apesar de seu potencial aparentemente ilimitado, a energia solar apresenta características de intermitência e difusão que impõem desafios ao seu aproveitamento contínuo e em grande escala. Sua disponibilidade flutua consideravelmente ao longo do dia e das estações, e sua densidade energética por unidade de área é inferior à dos combustíveis tradicionais, como o petróleo ou o gás natural. Para mitigar esses desafios e garantir um fornecimento de energia mais estável e confiável, são empregadas tecnologias de armazenamento de energia (TES – Thermal Energy Storage), que permitem estocar o calor excedente captado durante períodos de alta irradiação para utilização posterior, quando a demanda é maior ou a irradiação solar é insuficiente (GARRUÇO, 2022).

A pesquisa e o desenvolvimento em energia solar não se limitam apenas à melhoria da eficiência dos coletores, mas também se estendem à exploração de novas aplicações e à integração inteligente com outras tecnologias energéticas. Por exemplo, a avaliação do desempenho energético de sistemas híbridos, que combinam sistemas fotovoltaicos e térmicos associados a bombas de calor, simulados em softwares como o TRNSYS, ilustra a busca por

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

soluções otimizadas que maximizam o aproveitamento da energia solar em conjunto com outras tecnologias (JÚNIOR; LIMA, 2023).

Além disso, a simulação de viabilidade econômica de trocadores de calor acoplados a módulos fotovoltaicos busca otimizar a geração de calor residual a partir de sistemas elétricos solares (DE OLIVEIRA BUSSON ET AL., 2022). Essa abordagem de sinergia entre diferentes tecnologias visa a um aproveitamento mais completo do recurso solar. Para aplicações industriais, a energia solar térmica de pequena, média e alta temperatura oferece um potencial significativo e inexplorado para substituir o uso intensivo de combustíveis fósseis em processos que exigem calor. Por exemplo, os coletores de calha parabólica (PTCs), são amplamente utilizados para produção de calor de processos que vão desde 150 °C até 600 °C, sendo estas últimas ótimas para a geração de eletricidade em usinas solares de mediano e grande porte (KHAKRAH ET AL., 2018; BOUHAL ET AL., 2018).

Essa versatilidade e a capacidade de atender a uma ampla gama de demandas energéticas, desde o simples aquecimento de água em residências até complexos processos industriais que requerem altas temperaturas, demonstram que a energia solar é uma solução abrangente e em constante evolução. O futuro da matriz energética global dependerá, em grande parte, da contínua inovação e da adoção generalizada das diversas facetas do aproveitamento da energia solar, promovendo um desenvolvimento mais sustentável e resiliente para as futuras gerações.

2.2 TERMODINÂMICA

A Termodinâmica é a ciência fundamental para a compreensão e otimização de sistemas de aproveitamento de energia solar, ao explorar as relações entre calor, trabalho e energia. Suas leis básicas governam as transformações energéticas e estabelecem os limites dessas conversões (OLIVEIRA, 2025), fornecendo a base para a análise da eficiência em coletores solares e outros dispositivos térmicos.

A aplicação dos princípios termodinâmicos permite avaliar o desempenho dos coletores solares tanto pela eficiência energética (Primeira Lei) quanto pela (Segunda Lei). A eficiência exergética, que considera a qualidade da energia para realizar trabalho, é crucial para coletores de concentração que operam em temperaturas elevadas, onde o calor possui maior potencial de utilização (BELLOS ET AL., 2017). Além disso, a Termodinâmica é fundamental para o entendimento das propriedades termo físicas dos fluidos de trabalho (água, óleos térmicos, sais

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

fundidos), essenciais para o dimensionamento e previsão do comportamento dos sistemas em diversas condições operacionais (ANDRADE, 2021).

2.3. RADIAÇÃO

A radiação solar é a fonte primária de energia para sistemas foto térmicos, transmitida por ondas eletromagnéticas, e seu entendimento é crucial para o design e otimização de coletores. Essa energia abrange um vasto espectro e sua quantidade na superfície terrestre varia significativamente com localização, estação do ano, horário e condições atmosféricas (GONÇALVES ET AL., 2020). Em coletores estacionários, o ângulo de inclinação é um fator determinante para a radiação recebida (LV ET AL., 2018).

A interação da radiação solar com a atmosfera envolve absorção por gases como ozônio e vapor d'água, reflexão por nuvens e superfície, e espalhamento por partículas, gerando a radiação difusa. Esta radiação difusa, embora não direcional, ainda contribui para o potencial energético aproveitável pelos coletores (GONÇALVES ET AL., 2020). Segundo GONÇALVES ET AL. (2020), a radiação incidente é uma composição da radiação direta e difusa.

Apesar dos modelos existentes, a complexidade atmosférica e as variações climáticas tornam o cálculo preciso da radiação solar um desafio. Fatores como nebulosidade, aerossóis e umidade do ar alteram drasticamente a energia que chega aos coletores, impactando sua eficiência. A pesquisa contínua visa aprimorar a previsão e otimização da captação, sendo fundamental considerar a disponibilidade de radiação direta e difusa, além de possíveis sombreamentos, na seleção do local de instalação (GONÇALVES ET AL., 2020).

2.4. CONVECÇÃO

A convecção é um mecanismo fundamental de transferência de calor em sistemas de aquecimento solar, crucial tanto para a absorção de energia pelo fluido de trabalho quanto para as perdas térmicas. Ela envolve o movimento de fluidos que, ao aquecerem, ascendem, enquanto os mais frios descem, criando correntes contínuas (CAVALCANTE, 2023). Em coletores solares, a convecção natural é frequentemente explorada em sistemas de termos sifão, onde a circulação do fluido ocorre sem bombas externas, impulsionada por diferenças de densidade resultantes do aquecimento.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

A eficiência de um coletor é diretamente impactada pelas perdas de calor por convecção, que ocorrem principalmente da superfície absorvedora para o ar circundante. Para mitigar essas perdas, diversas estratégias de design são aplicadas. Em coletores de placa plana, a cobertura transparente cria uma camada de ar isolante que reduz as perdas convectivas (MIGUEL, 2021). Já em coletores de tubos evacuados, o vácuo entre o tubo absorvedor e o invólucro externo elimina quase por completo as perdas por convecção e condução, resultando em maior eficiência (SCHNEIDER, 2022).

Uma compreensão aprofundada da convecção é vital para a otimização de coletores solares, pois a transferência de calor eficiente para o fluido de trabalho é crítica. O coeficiente de transferência de calor por convecção é um parâmetro chave que determina as perdas térmicas e o desempenho geral do coletor (CAVALCANTE, 2023, p. 19). Este coeficiente é influenciado pela geometria do coletor, propriedades do fluido, velocidade do vento e diferença de temperatura, sendo que simulações computacionais de dinâmica dos fluidos (CFD) são ferramentas valiosas para modelar esses processos e aprimorar o design (SCHNEIDER, 2022).

Em sistemas de termos sifão, a convecção natural é o mecanismo predominante para a circulação do fluido. A água aquecida no coletor sobe para o reservatório, enquanto a mais fria desce, estabelecendo um ciclo contínuo (CAVALCANTE, 2023). A inclinação do coletor e o diâmetro dos tubos são parâmetros de projeto cruciais que afetam diretamente a eficiência da convecção natural. A pesquisa e o desenvolvimento buscam continuamente novos materiais e configurações para minimizar perdas convectivas, incluindo o estudo de nano fluidos e tecnologias de isolamento, exigindo uma abordagem integrada com condução e radiação para máxima eficiência energética (SCHNEIDER, 2022; MIGUEL, 2021).

2.5 CONDUÇÃO

A condução é um modo fundamental de transferência de calor que ocorre por contato direto entre partículas, transmitido energia de regiões de maior para menor energia cinética. Em coletores solares, a condução é crucial tanto para a transferência de calor útil quanto para as perdas energéticas (CENGEL & GHAJAR, 2009). A placa absorvedora, tipicamente de alta condutividade térmica (cobre ou alumínio), é projetada para conduzir rapidamente o calor solar absorvido para os tubos do fluido de trabalho.

A lei de Fourier descreve que a taxa de condução é proporcional à área e ao gradiente de temperatura, e inversamente proporcional à espessura do material (CENGEL & GHAJAR, 2009). O coeficiente de condutividade térmica, uma propriedade material, quantifica sua

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

capacidade de conduzir calor. Materiais com alta condutividade são usados onde a transferência de calor é desejada, enquanto isolantes com baixa condutividade minimiza as perdas, como nas paredes e no fundo do coletor.

O isolamento térmico nas paredes e no fundo do coletor é essencial para reduzir as perdas por condução para o ambiente. Materiais como lã de rocha, poliuretano ou fibra de vidro são empregados devido a sua baixa condutividade, criando uma barreira eficaz contra o fluxo de calor indesejado (CENGEL & GHAJAR, 2009). O projeto cuidadoso da espessura e tipo de isolamento é vital para otimizar o desempenho térmico geral do sistema.

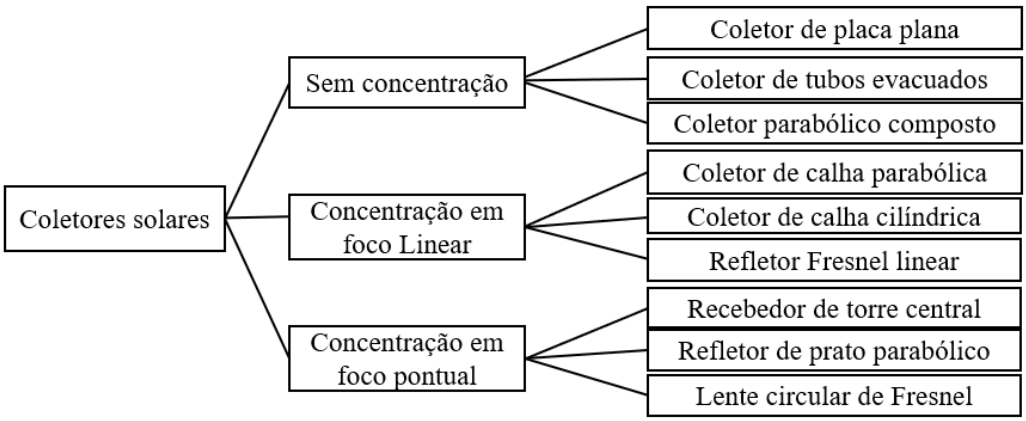
2.6 COLETORES SOLARES

Coletores solares são dispositivos essenciais para o aproveitamento da energia solar térmica, sendo projetados para absorver a radiação solar, convertê-la em calor e transferir essa energia térmica para um fluido de trabalho; geralmente água, ar, óleo ou nano fluido (KALOGIROU, 2004). Sua função principal é captar a energia do sol e disponibilizá-la para diversas aplicações, desde o aquecimento de água doméstica até processos industriais e geração de eletricidade. A evolução tecnológica dos coletores solares tem sido contínua, visando aumentar a eficiência, reduzir custos e expandir suas aplicações.

A Figura 2, apresentada a seguir, mostra uma classificação dos coletores solares, dividindo-os em três categorias principais: sem concentração, concentração em foco linear e concentração em foco pontual. Essa categorização reflete as diferentes abordagens para captar e concentrar a energia solar, cada uma otimizada para diferentes faixas de temperatura e necessidades energéticas. A constante inovação nesse campo busca desenvolver coletores mais eficientes e acessíveis, expandindo o uso da energia solar térmica como uma alternativa sustentável.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Figura 2: Tipos de coletores solares.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Esta figura esquematiza a classificação dos coletores solares, distinguindo entre aqueles que não utilizam concentração, os que concentram a energia em uma linha e os que concentram em um ponto. Essa taxonomia auxilia na compreensão da variedade de tecnologias disponíveis e suas respectivas aplicações.

Os coletores sem concentração, como os de placa plana e os de tubos evacuados, são caracterizados por não utilizarem sistemas ópticos para concentrar a radiação solar. Eles absorvem a radiação incidente em uma área relativamente ampla, sendo mais adequados para aplicações de baixa a média temperatura (KALOGIROU, 2004). Sua simplicidade de design e manutenção os torna populares para aquecimento de água doméstica e aquecimento de ambientes. A durabilidade e a facilidade de instalação são outras vantagens que contribuem para sua ampla adoção.

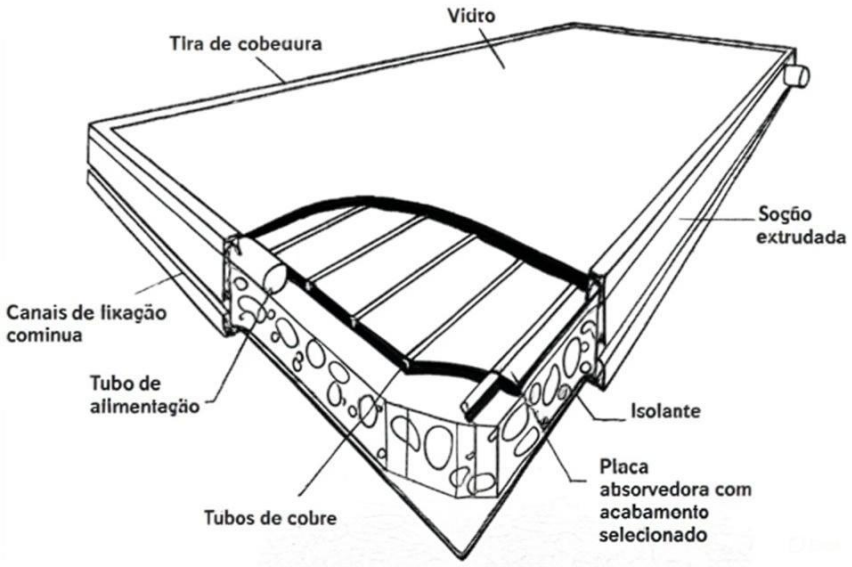
Por outro lado, os coletores de concentração, como os de calha parabólica e os de prato parabólico, utilizam espelhos ou lentes para focalizar a luz solar em uma área menor, atingindo temperaturas muito mais elevadas. Esses coletores são ideais para aplicações que exigem médias e altas temperaturas, como geração de energia elétrica e processos industriais. No entanto, para obtenção de maior eficiência às vezes demandam sistemas de rastreamento solar (tracking) para acompanhar o movimento do sol, aumentando a complexidade e o custo do sistema (KALOGIROU, 2004).

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

2.6.1 Coletor De Placa Plana

O coletor de placa plana configura-se como uma tecnologia solar térmica madura e extensivamente aplicada para o aquecimento de água em diversas escalas, desde residências até instalações comerciais. Sua proeminência reside na simplicidade de concepção, na robustez de sua construção e na relação custo-benefício atrativa, especialmente em regiões com boa incidência solar (KALOGIROU, 2004; MIGUEL, 2021). A estrutura fundamental de um coletor de placa plana, ilustrada esquematicamente na Figura 3, compreende uma caixa termicamente isolada que alberga uma placa absorvedora, geralmente metálica e na maioria das vezes equipada com tubos para a circulação do fluido de trabalho, sendo o conjunto coberto por uma superfície transparente.

Figura 3: Diagrama esquemático de coletor solar do tipo placa plana.



Fonte: Adaptado de Kalogirou (2004).

A ilustração acima detalha os componentes essenciais: a radiação solar global incidindo sobre a superfície transparente, a placa absorvedora de calor com tubos de elevação para o fluido (água fria entrando e água quente saindo), a estrutura isolante térmica e o isolamento inferior (alumínio ou espuma). O desenho esquemático explicita o princípio de funcionamento do coletor, onde a energia solar é absorvida e transferida para o fluido de trabalho.

O coletor de placa plana é um dispositivo amplamente utilizado para aquecimento de água solar, valorizado por sua simplicidade, robustez e custo-benefício. Sua estrutura consiste em uma caixa isolada termicamente, uma placa absorvedora metálica com tubos internos para

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

o fluido de trabalho, e uma cobertura transparente (MIGUEL, 2021; COSTA, 2022). A placa é projetada para otimizar a absorção da radiação solar e minimizar perdas por pre-radiação, enquanto a cobertura transparente atua criando um efeito estufa, permitindo a entrada de radiação solar e retendo o calor gerado (MIGUEL, 2021). A ausência de partes móveis complexas e sistemas de rastreamento avançados contribui para a facilidade de instalação, menor necessidade de manutenção e maior durabilidade, tornando-o uma escolha confiável para aplicações de baixa a média temperatura, tipicamente até 80°C (TAVARES, 2023).

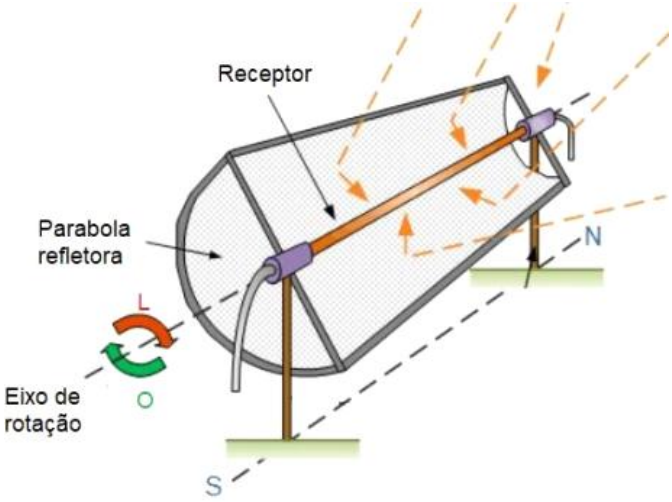
A eficiência térmica de um coletor de placa plana é influenciada por fatores como a intensidade da irradiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento e a diferença de temperatura entre o fluido e o ambiente (NAVUNGO ET AL., 2024). O isolamento térmico da caixa, utilizando materiais de baixa condutividade, é crucial para minimizar as perdas por condução e convecção (CARVALHO; SIONEK, 2015). Embora não atinja as altas temperaturas de coletores de concentração, sua capacidade de captar tanto a radiação solar direta, albedo quanto a difusa e o torna eficaz mesmo em dias parcialmente nublados. A manutenção é simples e periódica, focada na limpeza da superfície e verificação da integridade do sistema, contribuindo para um baixo custo operacional e vida útil prolongada (ABNT NBR 15569, 2020).

2.6.2 Coletor Solar De Calha Parabólica

O coletor solar de calha parabólica pode ser definido como uma calha com formato parabólico, cuja parte interna é revestida com um material altamente refletivo. Nesse dispositivo, a radiação solar é refletida e concentrada em uma linha focal, onde ocorre a troca térmica entre a energia solar e o fluido de transferência de calor (FTC), ou seja, no tubo absorvedor ou receptor. Esse absorvedor, geralmente é de formato cilíndrico ou retangular, comumente fabricado em aço inoxidável com revestimento externo em pintura preta ou eletrodeposição de materiais. Na qual é composto por óxido de alumínio e níquel, atuando de maneira seletiva, ou seja, absorvendo o espectro da luz solar e, ao mesmo tempo, apresentando baixa emissividade. A versatilidade do coletor parabólico de calha (PTC), é amplamente reconhecida, sendo a tecnologia mais empregada em escala comercial para sistemas de energia solar concentrada (Bouhal et al., 2018; Yilmaz e Mwesigye, 2018). A Figura 4 ilustra um coletor de calhas parabólicas (PTC), mostrando o refletor parabólico que concentra a radiação solar no receptor, onde o calor é transferido para um fluido de trabalho.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Figura 4: Coletor de calhas parabólicas (PTC).



Fonte: Adaptado de BELLO et.al. (2016).

Esta imagem esquemática ilustra o princípio de funcionamento de um coletor de calhas parabólicas, onde espelhos parabólicos ou calhas, refletem e concentram a radiação solar em um receptor tubular. Conforme mencionado anteriormente, o calor absorvido pelo receptor é transferido para um fluido de trabalho (FTC), possibilitando as diversas aplicações térmicas e geração de energia elétrica. Coletores de concentração solar com rastreamento, como o coletor de calha parabólica (PTC), são cruciais para alcançar altas temperaturas e eficiência na captação de energia solar. (BELLOS ET AL., 2018b). Para maximizar a energia, empregam sistemas de rastreamento de eixo único ou duplo que acompanham o sol, elevando significativamente a eficiência térmica e a temperatura operacional (BATAYNEH ET AL., 2019).

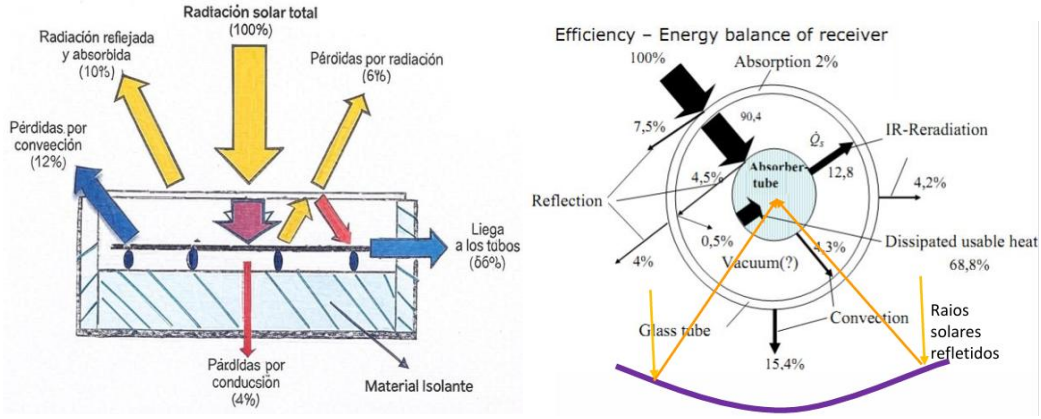
Apesar de seus benefícios em eficiência, os sistemas de rastreamento aumentam custos e complexidade de instalação e manutenção (BUONOMANO ET AL., 2018). Contudo, a pesquisa contínua foca na otimização e mitigação desses desafios, com estudos de simulação e experimentação (BERCHT, 2021; MENDONÇA, 2019), além do desenvolvimento de sistemas de controle mais acessíveis e inovação em materiais (BARBOSA, 2009). Uma vantagem crucial dos PTCs é a integração com sistemas de armazenamento de energia térmica (TES), que superam a intermitência solar, garantindo um fornecimento contínuo e versátil para diversas aplicações, consolidando seu papel na transição para energias sustentáveis (PELAY ET AL., 2017; WEI ET AL., 2018; AL-ADDOUS ET AL., 2020). Sem embargo, no presente trabalho não serão incluídos os estudos de tracking e TES, assim como a simulação de tubos evacuados em PTCs.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

2.7 EFICIÊNCIA TÉRMICA

A eficiência térmica de um coletor solar constitui o parâmetro mais crítico para a avaliação de seu desempenho global. Ela é definida como a razão entre a energia térmica útil coletada pelo fluido de trabalho e a energia solar incidente sobre a área do coletor (KALOGIROU, 2004, Duffie e Beckman, 1991). Em termos práticos, uma eficiência térmica superior significa que uma proporção maior da radiação solar captada é convertida em calor utilizável para diversas aplicações. O objetivo primordial no projeto de qualquer coletor solar é maximizar essa eficiência, o que envolve uma estratégia dupla: otimizar a absorção da energia solar e, simultaneamente, minimizar as inevitáveis perdas de calor para o ambiente externo, que ocorrem pelos modos de condução, convecção e radiação (SCHNEIDER, 2022; PENNA, 2021). Na figura 5 são apresentados os gráficos do balanço energético do coletor de placa plana e parabólica em calha.

Figura 5: Balance energético do coletor de placa plana e parabólico em calha**.**



(a) (b)

Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman. (2019)

O cálculo da eficiência térmica é tradicionalmente realizado por meio de balanços de energia, que contabilizam a energia útil transferida para o fluido em relação às perdas. Normas técnicas, como a ABNT NBR 15569:2020 para sistemas de aquecimento solar de água, estabelecem diretrizes e métodos para a avaliação do desempenho térmico dos coletores, garantindo que os sistemas atendam a padrões mínimos de eficiência e segurança. Em suma, a eficiência térmica é um indicador complexo e multifacetado, essencial para o desenvolvimento, otimização e sucesso comercial dos coletores solares. O avanço nesse campo é impulsionado pela inovação em ciência dos materiais, engenharia de projetos e técnicas de simulação e

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

validação, garantindo que a energia solar térmica continue a expandir sua contribuição para a matriz energética global

3. METODOLOGIA

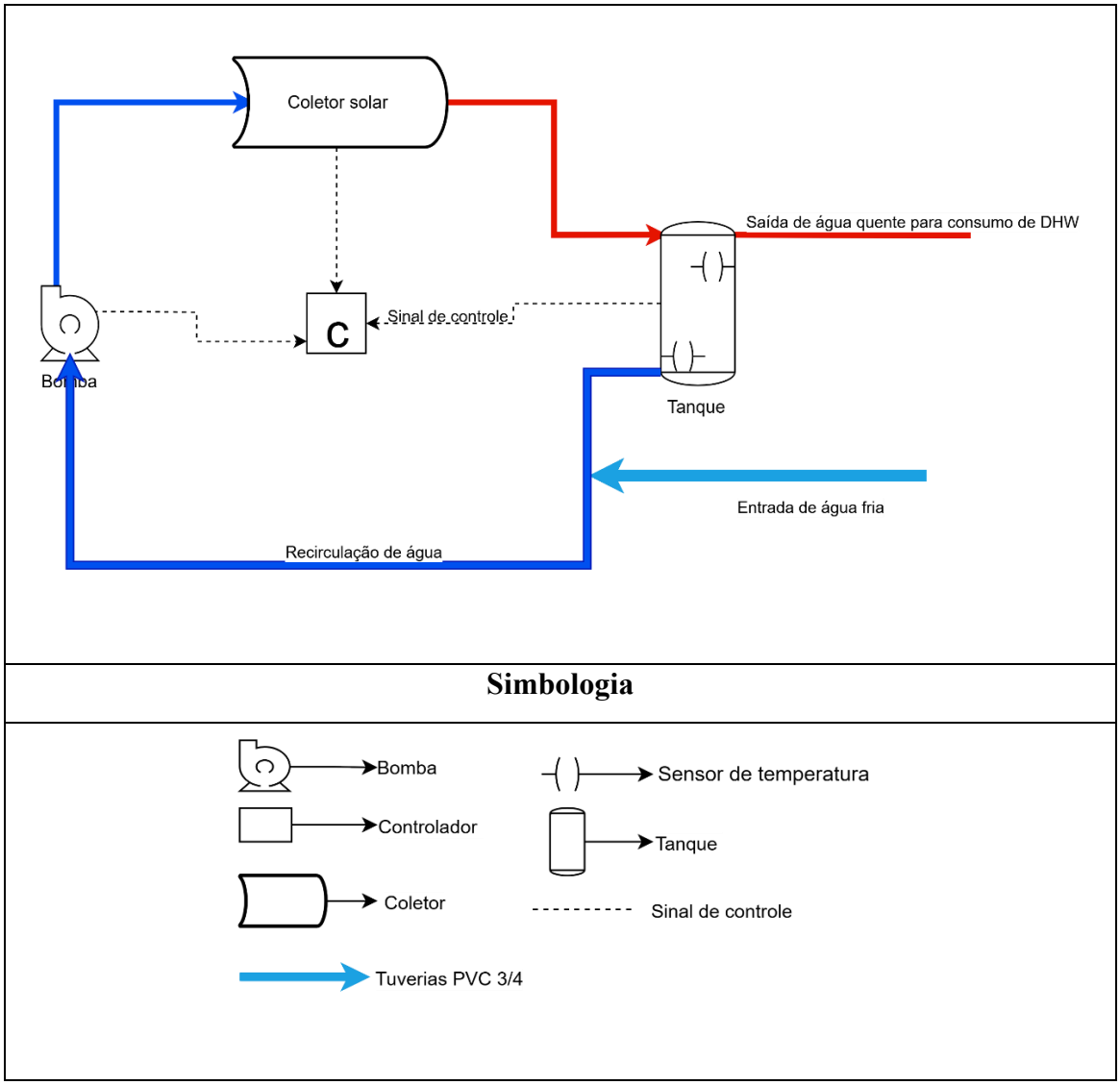
Neste capítulo apresenta-se o diagrama esquemático do sistema com coletores a ser estudado ou *Layout*, bem como o software a ser utilizado, o TRNSYS. Além disso, serão apresentadas as principais fórmulas relacionadas aos componentes do sistema proposto e desempenho do coletor utilizado. Finalmente, as bases para a avaliação definitiva do sistema serão estabelecidas por meio das informações climáticas disponíveis no Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS).

3.1 SISTEMA BASE PROPOSTO PARA A SIMULAÇÃO NO TRNSYS

O sistema proposto considera uma configuração genérica de coletor solar, capaz de representar tanto uma calha parabólica PTC ou um coletor de placa plana, operando em condições de baixa temperatura. Esses coletores estão conectados a um tanque de armazenamento (boiler), utilizando para aquecimento do fluido térmico (água). A simulação foi realizada no software TRNSYS 18, incluindo um circuito de bombeamento, onde foi utilizado uma bomba de circulação e um controlador para acionamento automático da bomba, conforme as condições de operação. Cabe ressaltar que o layout base do sistema foi arquitetado de forma modular, possibilitando sua aplicação em trabalhos futuros para diferentes aplicações, tais como: refrigeração por adsorção, aquecimento de piscinas, geração de vapor, dentre outros. A figura 6 apresenta o esquema geral do sistema modelado, na qual mostra um sistema simples de aquecimento de água utilizando energia solar. Os sistemas funciona da seguinte maneira: na simulação, o coletor solar absorve a radiação solar global ou radiação direta normal (DNI), dependendo de operarmos com coletores de placa plana ou com PTC, respectivamente. Assim, torna-se possível elevar a temperatura da agua que circula entre o coletor solar e o tanque de armazenamento (circuito fechado). No diagrama proposto também se prevê um controlador responsável pelo controle vazão mássica (kg/h) e temperatura (°C). A configuração proposta indica um sistema básico e eficaz, com a possibilidade da inclusão de periféricos para resfriamento ou aquecimento de sistemas a futuro, conforme mencionado.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Figura 6: Sistema solar proposto ou Layout a ser simulado no software TRNSYS.



Fonte: Elaboração própria (2025).

A imagem mostrada acima representa um sistema simples de aquecimento de água utilizando energia solar, composta de dispositivos básicos, como coletores solares, tanque de armazenamento (boiler) e um sistema de circulação da água. O coletor solar absorve a radiação solar e eleva a temperatura da água que passa por ele. A bomba facilita a recirculação da água do tanque para o coletor. Já o tanque aquecedor ou boiler, armazena a água aquecida e recebe água fria para manter o ciclo. No diagrama proposto também se prevê um controlador responsável pelo controle vasão mássica (kg/h) e temperatura (°C). A configuração proposta indica um sistema básico e eficaz, com a possibilidade da inclusão de periféricos para resfriamento ou aquecimento de sistemas a futuro.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

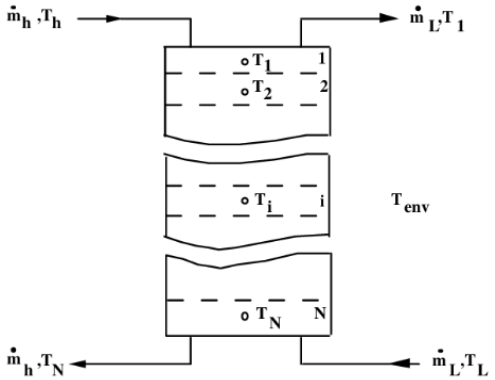
3.2 DESCRIÇÃO DOS TYPES

Antes de descrever os Types, precisamos apresentar o software TRNSYS, programa de computador feita para simulações de sistemas transientes, desenvolvido pela Universidade Wisconsin, EUA. Inicialmente foi criada para simulações dinâmicas de sistemas térmicos e energéticos. Amplamente utilizada em pesquisa, projetos e análises de sistemas de energia renovável, climatização, aquecimento refrigeração e eficiência energética em edifício. O TRNSYS foi criado usando a linguagem de codificações FORTRAN, a qual tem dois elementos principais: o mecanismo (Kernel), que interpreta e gerencia as entradas, resolve as equações, estabelece a convergência e representa as variáveis do sistema. Por outro lado, a biblioteca de componentes ou módulos denominados TYPE's, modela determinados tipos de dispositivos ou componentes, além de fenômenos físicos, condições climáticas, dentre outros. E funcionam como uma caixa preta com entradas, e parâmetros de saída, a continuação descreveremos os principais Type's utilizados nesta simulação.

3.2.1 Type Do Tanque Estratificado

O componente Type 4c foi empregado para o tanque, possuindo a característica de estratificar a temperatura do fluido armazenado em nós ou segmentos volumétricos, a figura 7 apresenta o diagrama do modelo. Além disso possuem dois elementos de aquecedores auxiliares por resistências elétricas, que podem ser ativada ou desativadas. As entradas do componente são o fluxo de massa e à temperatura do fluido que entra pelo sistema circulatório e o que entra por um suprimento de água. No sistema de tanque, o fluxo para o coletor entra pela parte inferior, o fluxo do coletor chega à parte superior, o fluxo para consumo sai da parte superior e o fluxo da rede de água potável entra pela parte inferior.

Figura 7: Diagrama do modelo de tanque TYPE4C.

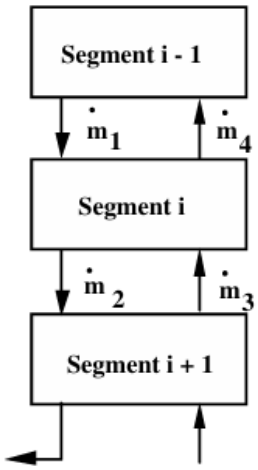


Fonte: Manual de referência matemática TRNSYS 2018.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Uma suposição empregada nesse modelo é a de que os fluxos de massa, e temperatura de fluido que sobem e descem de cada nó são totalmente misturados antes de entrarem em cada segmento como se mostra na figura 8.

Figura 8: Fluxo entre Segmentos.



Fonte: Manual de referência matemática TRNSYS 2018.

3.2.2 Type Do Controlador Diferencial

O TYPE2b é um controlador que gera uma função de controle γ_0 $(0\ ou\ 1)$ com base na diferença entre temperaturas superior (TH) e inferior (TL), comparada a duas bandas mortas de temperatura (ΔTH e ΔTL). O valor de γ_0 depende do estado anterior γ_i (0 ou 1), criando histerese quando γ_0 é conectado a γ_i. Incluí um corte limite alto por segurança, definindo $\gamma_0 = 0$ se o limite for excedido. Além disso se apresenta as seguintes equações do controlador ligado e desligado:

Se o controlador estava antes ligado:

$$\gamma_i = 1\ e\ \Delta T_L \leq (T_H - T_L), \qquad \gamma_0 = 1 \tag{1}$$

$$\gamma_i = 1\ e\ \Delta T_L > (T_H - T_L), \qquad \gamma_0 = 0$$

Se o controlador estava antes desligado:

$$\gamma_i = 0\ e\ \Delta T_H \leq (T_H - T_L), \qquad \gamma_0 = 1 \tag{2}$$

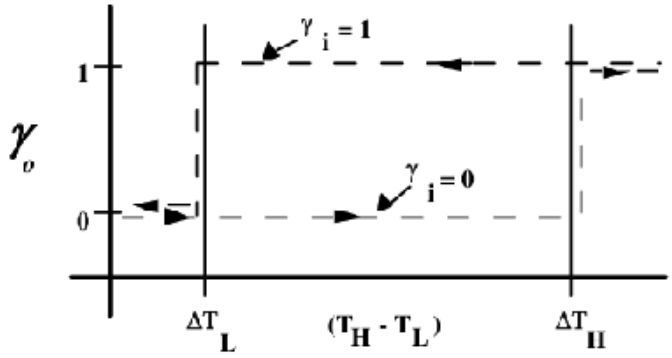
$$\gamma_i = 0\ e\ \Delta T_H > (T_H - T_L), \qquad \gamma_0 = 0$$

A função de controle é definida como zero, independentemente das condições de banda morta superior e inferior, se $T_{in} > T_{max}$. Essa situação é frequentemente encontrada em

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

sistemas de água quente doméstica em que a bomba não pode funcionar se a temperatura do tanque estiver acima de algum limite prescrito. A função do controlador é ilustrado na figura 9.

Figura 9: Função Controladora.



Fonte: Manual de referência matemática TRNSYS 18.

3.2.3 Type Da Bomba De Circulação

Para a bomba emprega-se o componente Type 3d disponível no TRNSYS, que leva em conta como entrada o fluxo mássico de entrada e um sinal variando entre 0 e 1, sendo 1 o fluxo máximo nominal do dispositivo. Para os estudos dos sistema do coletores placa plana e PTC, considera-se uma bomba de circulação de água da marca KOMECO, com as seguintes especificações como mostra na tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de especificação de bomba de circulação de água.

Bomba de circulação de água		
Modelo	TP 120 G1 Bronze	-
Potência	350	W
Tensão	127	V
Corrente de Operação	2,75	A
Sistema de Acionamento	Fluxostato	-
Vazão máxima	60	l/min
Vazão mínima	2	l/min
Pressão máxima	18	m.c.a
Peso	5,6	kg
Dimensões	193x180x172	mm
Temperatura máxima	90	°C
Grau de proteção	IP 44	-

Fonte: Adaptado ficha técnica KOMECO. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

3.2.4 Modelo De Coletor Solar De Placa Plana Com Tubos Normal

O TYPE1b é um modelo de simulação usado para prever o desempenho térmico de um coletor solar de placa plana, que podem ser conectados em série e em paralelo. Para funcionar, o modelo necessita de resultados de testes de eficiência padrão do coletor, baseados na relação entre a radiação solar e a diferença de temperatura do fluido em relação na temperatura ambiente. Sua característica principal é o uso de uma função quadrática de segunda ordem para calcular o modificador de angulo de incidência. Embora apareça no rotula da tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros do coletor solar placa plana com tubo normal.

Coletor de Placa Plana		
Nome	Apricus FPC-E20	-
Quantidade	1	-
Dimensões	2000x1000x70	mm
Area de apertura	1,824	m^2
Superfície total	2	m^2
Peso total seco	30	kg
Capacidade do fluido	1500	ml
Pressão máxima	900	kPa
Potência máxima	1170	W

Fonte: Adaptado ficha técnica Apricus (2025).

Com base na fórmula de Hottel-Whillier (Duffie e Beckman, 1991), podemos encontrar uma equação geral para a eficiência dos coletores solares térmicos, conforme mostrado na equação (3).

$$\eta = \frac{Q_u}{AI_T} = \frac{\dot{m}C_{pf}(T_o - T_i)}{AI_T} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \quad (3)$$

No caso de um coletor sem vidro, a transmitância-absorbância normal $(\tau\alpha)_n$ é considerada simplesmente como a absorbância do painel α:

$$\eta = \frac{Q_u}{AI_T} = \frac{\dot{m}C_{pf}(T_o - T_i)}{AI_T} = F_R\alpha - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \quad (4)$$

Para determinar a eficiência do coletor, e necessário calcular tanto o coeficiente de perda de calor U_L quanto o fator de remoção de calor F_R. O coeficiente de perda U_L não é exatamente constante, portanto, uma expressão melhor é obtida levando em consideração uma dependência linear de U_L em relação a $(T_i - T_a)$.

$$U_L' = U_L + U_{L/T}(T_i - T_a) \quad (5)$$

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

O fator de remoção de calor F_R são um valor adimensional entre 0 e 1 que relaciona a energia útil atual obtida de um coletor com a energia obtida se toda a superfície do coletor estivesse a temperatura de entrada do fluido. (Duffie e Beckman, 1991):

$$F_R = \frac{\dot{m}C_{pf}}{AU_L}\left[1 - exp\left(\frac{AU_L F}{\dot{m}C_{pf}}\right)\right] \quad (6)$$

Onde ṁ é o fluxo mássico, C_{pf} o calor específico do fluido, A é área do coletor e F o fator de eficiência do coletor.

3.2.5 Modificador De Ângulo De Incidência (IAM)

Para coletores de placa plana, $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$ pode ser aproximado a partir dos resultados dos testes da SHRAE (ASHRAE, 2003) da seguinte forma:

$$\frac{(\tau\alpha)_b}{(\tau\alpha)_n} = 1 - b_0\left(\frac{1}{cos\,\theta} - 1\right) - b_1\left(\frac{1}{cos\,\theta} - 1\right)^2 \quad (7)$$

Os modificadores do ângulo de incidência tanto para o céu, $(\tau\alpha)_S/(\tau\alpha)_n$, quanto para radiação difusa dos solos $(\tau\alpha)_g/(\tau\alpha)_n$, são determinados, definindo ângulo de incidência equivalentes para a radiação direta que fornecem a mesma transmitância que para a radiação difusa (Duffie e Beckman, 1991). Os ângulos de incidência efetivos para a radiação difusa do céu e a radiação refletida pelo solo são:

$$\theta_{ceu} = 59.68 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \quad (em\ grau) \quad (8)$$

$$\theta_{gnd} = 90.00 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \quad (em\ grau) \quad (9)$$

3.2.6 Modelo De Coletor Solar De Tipo Calha Parabólico PTC

O TYPE1358 é um coletor solar de calha parabólica que concentra a radiação em um tubo receptor formado por um tubo de vidro externo e um tubo absorvedor interno com fluido o espaço entre eles costuma estar evacuado, mas pode conter ar, água, óleo ou hidrogênio dissociado do fluido de trabalho. O modelo 1358 simula o desempenho transitório de um coletor solar térmico avaliado conforme a norma EN12975-2. Ele emprega um arquivo externo contendo informações sobre o modificador do ângulo de incidência (IAM) para a radiação do

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

feixe, de acordo com o ângulo de incidência na superfície do coletor. A tabela 4 é apresentado os parâmetros geométricos do PTC proposto neste estudo (Fiamonzini 2022).

Tabela 4: Parâmetros geométricos do PTC.

Parâmetros geométricos do PTC		
Parâmetro	**Medidas**	**Dimensões**
Abertura da calha parabólica (Wa)	110	cm
Comprimento da calha parabólica (L)	200	cm
Area de abertura do coletor	2,2	m^2
Fator de concentração geométrico (C)	8,34	-
Angulo de abertura	90	◦
Abertura do coletor na altura focal (Hp)	44,75	cm
Comprimento da curva da parábola (S)	140	cm
Distância focal (f)	16	cm
Diâmetro externo do tubo absorvedor (D1)	42	mm
Diâmetro interno do tubo absorvedor (D2)	39	mm
Material tubo absorvedor	-	-
Absortividade	97	%
Emissividade	90	%

Fonte: Adaptado de FIAMONZINI (2022).

De acordo com Kalogirou (2014), a eficiência do sistema solar (η) pode ser avaliada experimentalmente (η_e) usando a equação 10, que representa a razão entre o ganho da energia (Q_u),e a radiação solar disponível (Q_s), esta radiação solar disponível e obtida a partir de dois dados de radiação solar direta (I_b) e da aera da abertura do coletor (A_a), onde (C_p) e (ṁ) correspondem respectivamente, ao calor específico e ao fluxo de massa.

$$\eta_e = \frac{\dot{m}C_P[T_s - T_e]}{[A_a I_b]} = \frac{Q_u}{Q_s} \tag{10}$$

Com base na fórmula (Duffie e Beckman, 2013), podemos encontrar uma equação geral para a eficiência do coletor solar térmico, conforme mostrado na equação (11).

$$\eta_t = \frac{A_r F_r \left[\eta_0 I_b - \frac{U_L}{C}(T_e - T_a)\right]}{[A_a I_b]} \tag{11}$$

Onde A_r e a área do tubo absorvedor, F_r fator de remoção, η_0 eficiência ótica, I_b radiação solar direta, U_L coeficiente de perda térmicas, C fator de concentração, T_e temperatura de entrada, T_a temperatura ambiente e A_a área de abertura.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

3.2.7 Modelo de temperatura do céu.

Para os propósitos do modelo, o componente de variáveis climatológicas Type 15-3 calcula a temperatura efetiva do céu (T_{sky}) com base no modelo apresentado por Martin e Berdahl (1984). Primeiramente, a demissibilidade efetiva de um céu claro é calculada em função da temperatura do ponto do orvalho ambiente T_{dp}:

$$\in_{0,sky} = 0.711 + 0.56\left(\frac{T_{dp}}{100}\right) + 0.73\left(\frac{T_{dp}}{100}\right)^2 + 0.013\cos(2\pi\frac{t_m}{24}) + \frac{0.012}{100}(P - 1000) \quad (12)$$

Onde t_m representa a hora do dia e, para os propósitos desta correção, a equação leva em conta a pressão P medida em milibares. A temperatura do ponto de orvalho e um parâmetro fornecido pelo modulo, porém está relacionada à umidade relativa (RH) do ambiente.

Após determinar a emissividade do céu claro, a emissividade do céu nublado e ajustada com base no fator de nebulosidade f_{nuvem}. Nesse caso, 0 representa um céu totalmente nublado. Por fim, considera-se a emissividade da nuvem, parâmetros que são disponibilizados pelo modulo Type15-3.

$$\in_{ceu} = \in_{o,ceu} + \left(1 + \in_{o,ceu}\right) * f_{nuvem} * \in_{nuvem} \quad (13)$$

Por fim, a temperatura efetiva do céu T_{ceu} é:

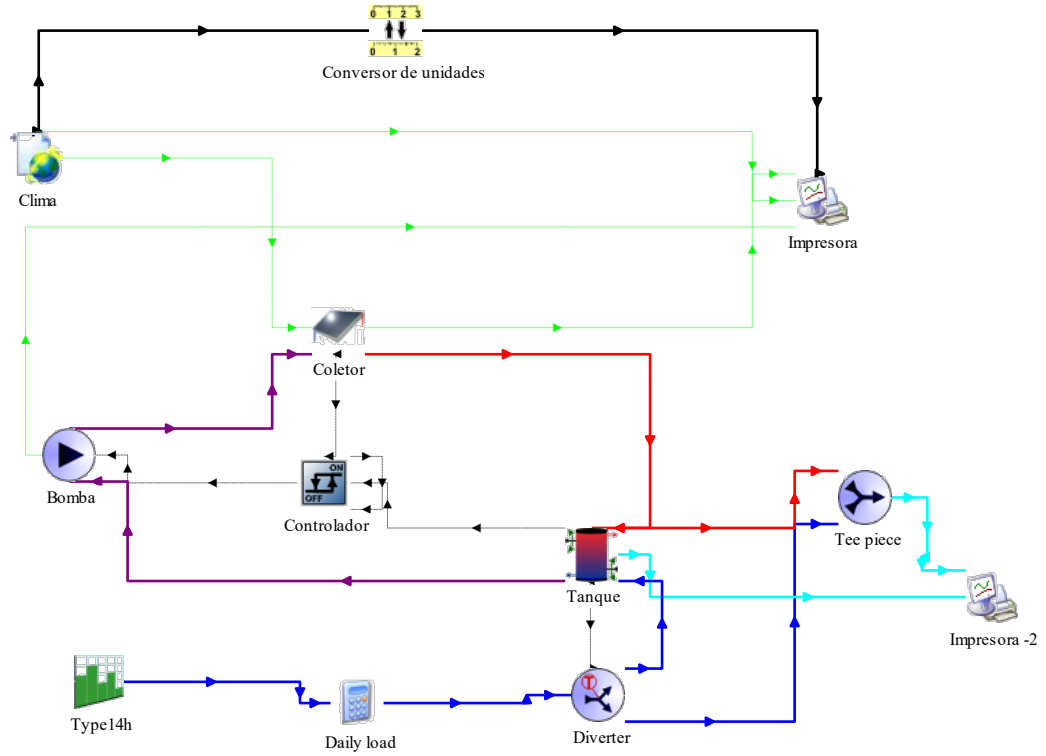
$$T_{ceu} = \in_{ceu}^{0.25} + (T_{amb} + 273.15) - 273.15 \quad (14)$$

3.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA SOLAR NO TRNSYS

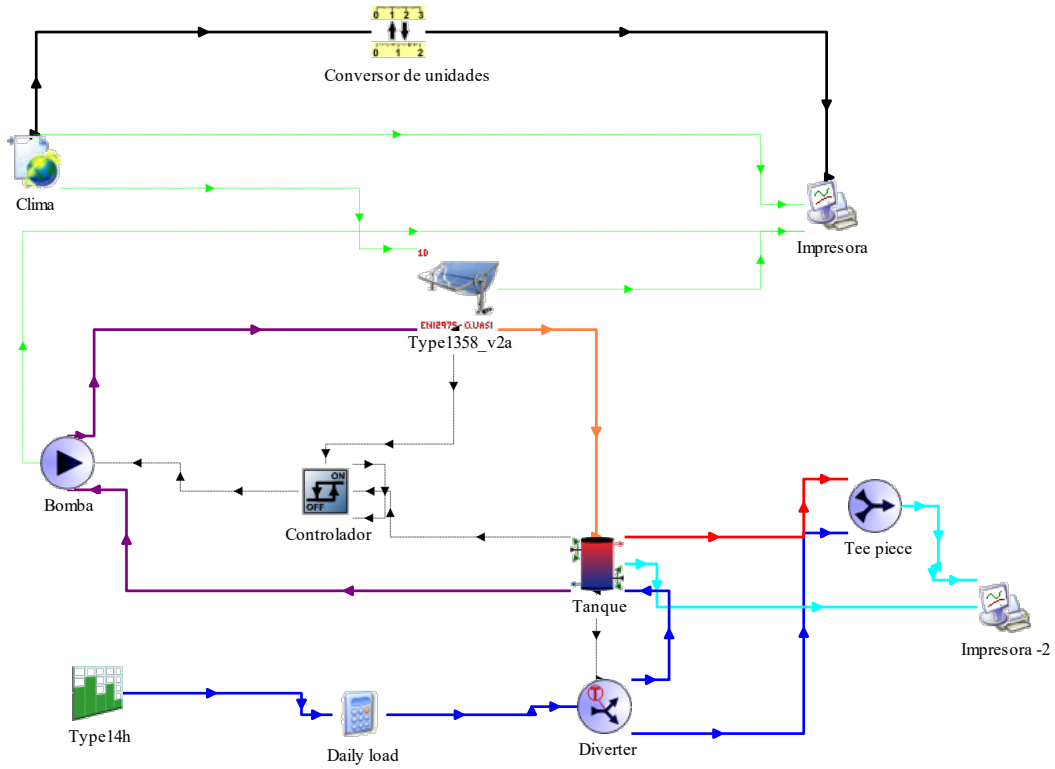
O sistema foi avaliado usando os arquivos meteorológicos disponíveis na biblioteca do TRNSYS 18, usando o componente TYPE15 para informações climáticas, escolhendo o arquivo correspondente a três cidades diferentes, a primeira cidade selecionada é a cidade de Cuenca, pertencente ao Equador, para o efeito de validação do sistema proposto e outras cidades como Foz do Iguaçu-Paraná e Alvorada do Norte-Goiás, pertencentes ao Brasil, foram selecionados para realizar a simulação uma vez validado os modelos propostos. A figura 10 mostra o projeto final do modelo elaborado com o software, incluindo seus principais componentes e conexões. Os componentes empregados na modelagem deste sistema são exibidos no anexo 3.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Figura 10: Modelo geral dos coletores gerados no TRNSYS a) FPC e b) PTC.



(a) Modelo geral do coletor de placa plana (FPC).



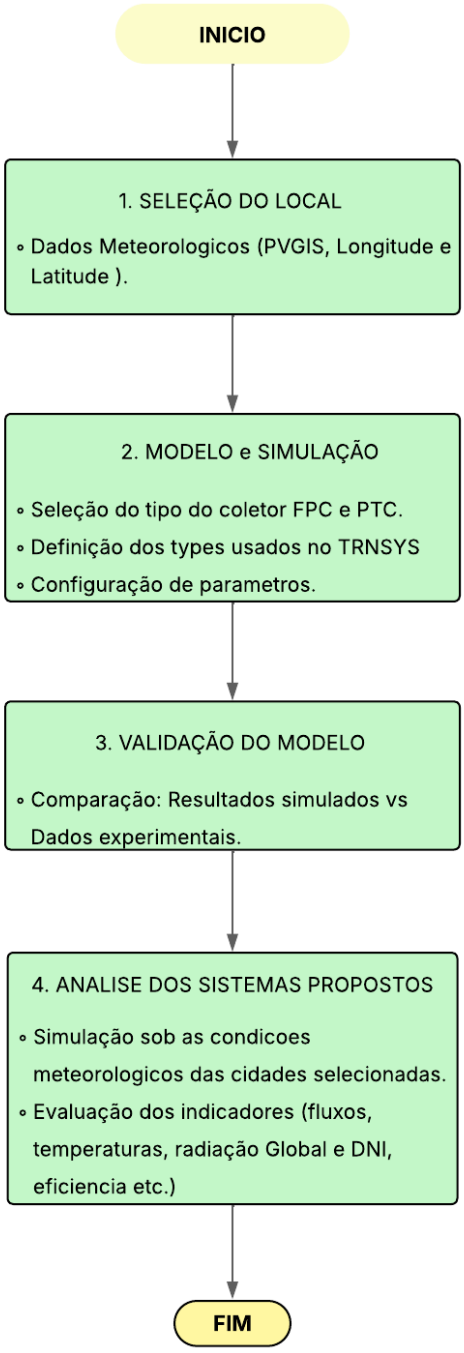
(b) Modelo geral do coletor solar de calha parabólica (PTC).

Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

A figura 11 apresenta o fluxograma com a metodologia proposta para este trabalho, detalhado no parágrafo acima.

Figura 11: Diagrama de fluxo da metodologia utilizando no TRNSYS.



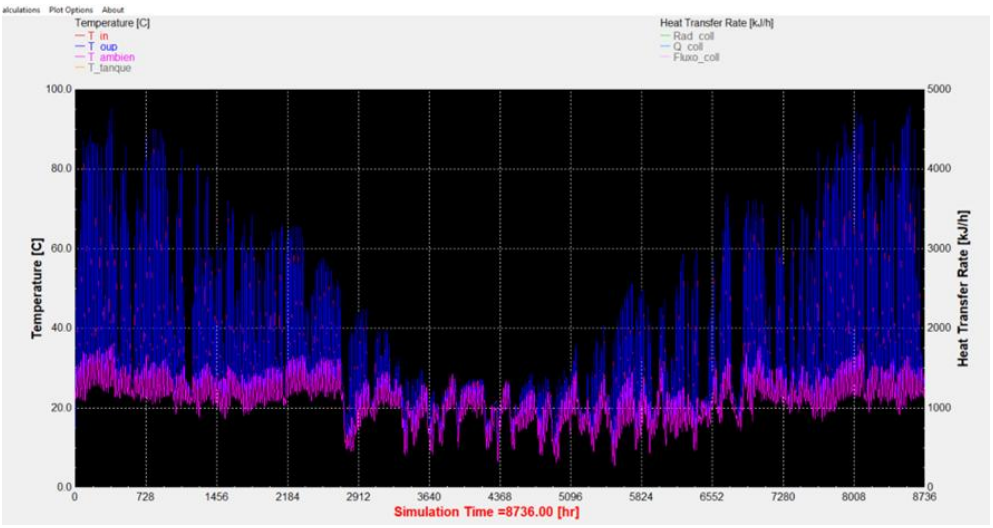
Fonte: Elaborado pelo Autor. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

4. DESCRIÇÃO DE RESULTADOS

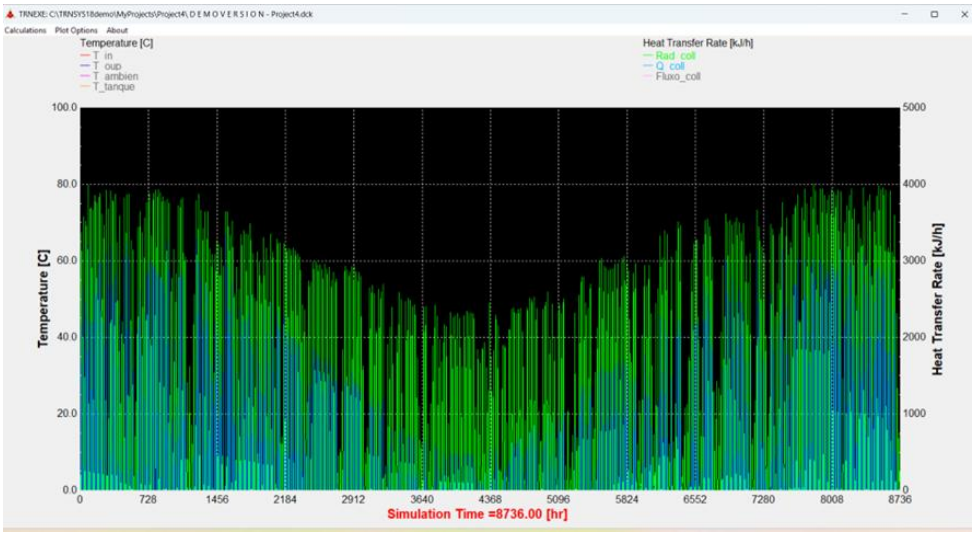
A simulação no TRNSYS para os sistemas de coletores propostos de placa plana (FPC) e de calha parabólica (PTC), foi realizada em dois distintas cidades, a primeira cidade simulada foi na cidade de Foz do Iguaçu, estado de Paraná e a segunda cidade de Alvorada do Norte estado do Goiás, pertencentes ao Brasil, essa simulação foram realizados numa base anual, de janeiro a dezembro para os modelos propostos. A figura 12 e 13 mostra a simulação do sistema do coletor de placa plana para cidade de Foz do Iguaçu nas coordenadas -54,549 longitude e a -25,5005 latitudes, com uma inclinação do coletor de 25.50 grados onde mostra-se as temperaturas, radiação global e o calor útil do coletor.

Figura 12: Simulação de sistema em TRNSYS.



Fonte: TRNSYS 18. (2025)

Figura 13: Simulação de sistema em TRNSYS.

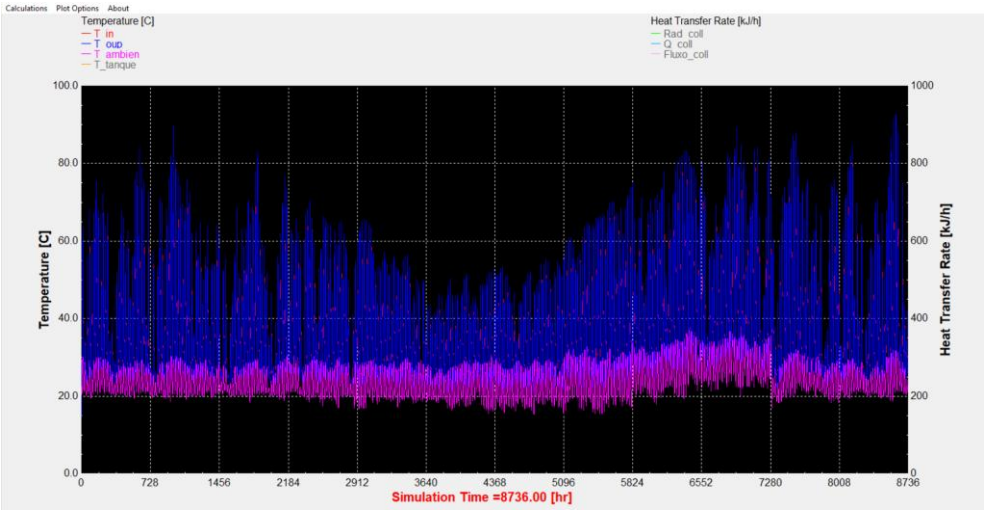


Fonte: TRNSYS 18. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

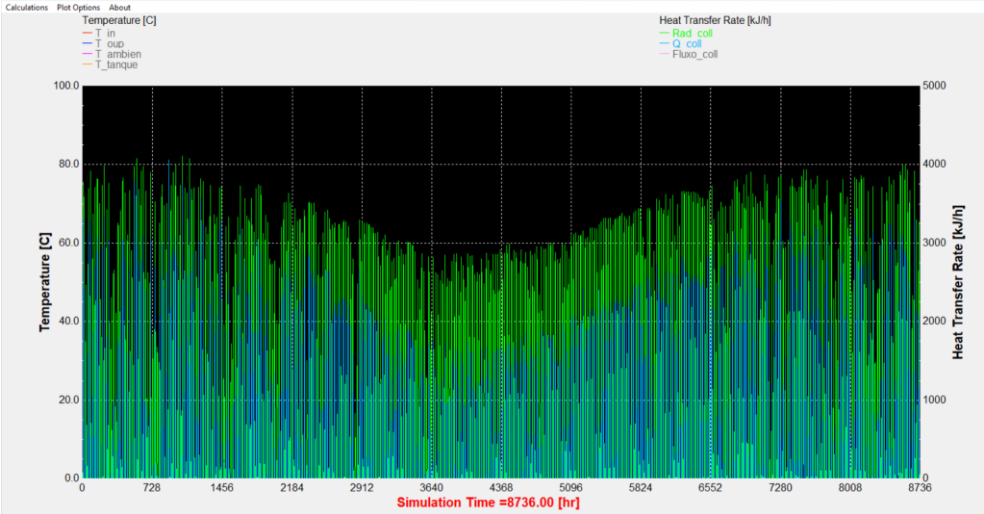
Já a figura 14 e 15 mostra a simulação do sistema do coletor de placa plana, para a cidade de Alvorada do Norte nas coordenadas -46,649 longitude e a -14,60 latitude, com uma inclinação do coletor de 14,00 grados onde mostra-se as temperaturas, radiação global e o color útil do coletor.

Figura 14: Simulação de sistema em TRNSYS.



Fonte: TRNSYS 18. (2025)

Figura 15: Simulação de sistema em TRNSYS.



Fonte: TRNSYS 18. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

4.1 VALIDAÇÃO SISTEMA DO COLETOR DE PLACA PLANA

Para validar a simulação do sistema do coletor de placa plana com tubos normais, usaram-se dados reais obtidos de uma dissertação da universidade de Cuenca, Equador com as coordenadas de 2°5402 de latitude sul e 79°0039 de longitude oeste, a simulação da temperatura de saída do coletor, expressos em graus Celsius (°C), juntamente com a porcentagem de erro correspondente a cada hora de simulação. A simulação, foi realizado para a fecha do dia 2 de maio do ano 2021, levou-se em conta um intervalo de 24 horas, conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5: Resultado da validação do coletor de placa plana com tubo.

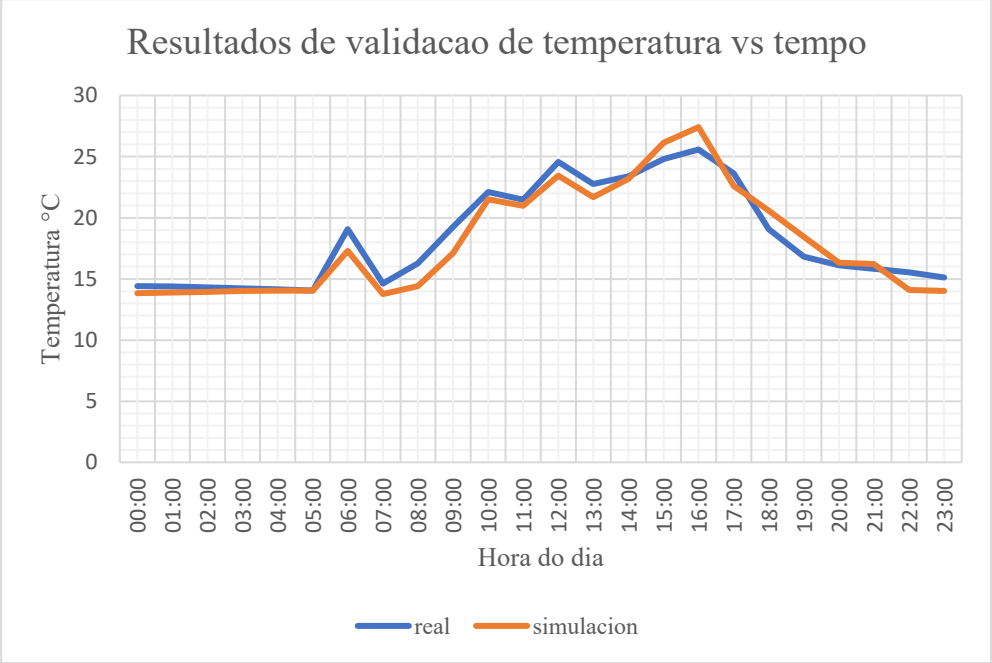
Hora	Temperatura de saída experimental real do coletor (°C)	Temperatura de saída da simulação TRNSYS do coletor (°C)	Erro %
00:00	14,40	13,83	3,93
01:00	14,38	13,89	3,42
02:00	14,30	13,93	2,59
03:00	14,22	14,02	1,42
04:00	14,15	14,06	0,66
05:00	14,05	14,03	0,13
06:00	19,07	17,30	9,28
07:00	14,62	13,76	5,88
08:00	16,28	14,42	11,43
09:00	19,25	17,12	11,06
10:00	22,12	21,50	2,80
11:00	21,48	20,97	2,37
12:00	24,58	23,44	4,64
13:00	22,77	21,68	4,80
14:00	23,38	23,19	0,81
15:00	24.80	26,14	5,40
16:00	25,58	27,41	7,15
17:00	23,62	22,61	4,28
18:00	19,07	20,59	7,97
19:00	16,82	18,44	9,63
20:00	16,12	16,33	1,30
21:00	15,83	16,21	2,40
22:00	15,53	14,11	9,18
23:00	15,12	14,02	7,27

Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Na figura 16, observa-se que os dados reais e simulados do coletor de placa plana com tubo, tem uma tendencia aceitável, e determina-se estatisticamente que esses dados simulados se ajustam à mesma distribuição dos dados reais, a simulação foi simulado a β=14.00, onde beta é o ângulo de inclinação em que o coletor foi colocado para realizar a simulação para a validação do sistema de coletor de placa plana.

Figura 16: Validação da simulação no TRNSYS da cidade de Cuenca-Equador.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

4.1.2 Resultados Do Caso Estudo Do Sistema Do Coletor Solar De Placa Plana (FPC)

Uma vez validado o sistema proposto, no item anterior. Apresentaremos ao resultados obtidos para as cidades de Foz do Iguazú e Alvorada do Norte. Assim, a tabela 6 apresenta os resultados da simulação do sistema de coletor de placa plana obtidos e analisados mensalmente das temperaturas, radiação global, calor útil do coletor e as eficiências reais y teóricas nas condições climatológicas da cidade de Foz do Iguazú. Esses resultados confirmam que, embora simples e de baixo custo, o coletor com tubos apresenta limitação de desempenho, devido às condições climáticas da cidade, sendo mais adequado para aplicações de aquecimentos de água em pequenas instalações residenciais ou rurais.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Tabela 6: Resultados da simulação no TRNSYS da cidade de Foz do Iguazú.

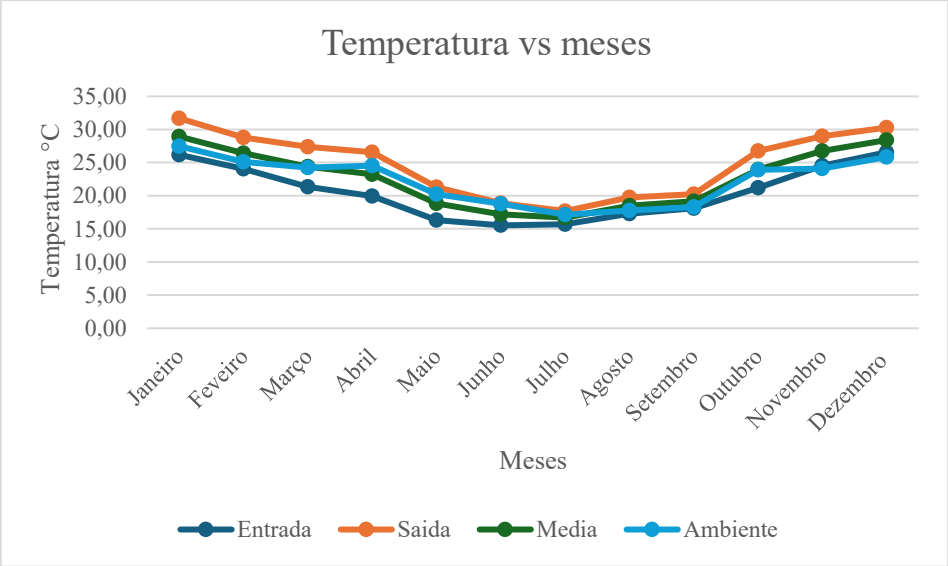
Meses	Temperatura entrada (°C)	Temperatura Saida (°C)	Temperatura média (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Radiação solar do coletor (W/m²)	Calor útil do coletor (W)	Eficiência TRNSYS (%)	Eficiência teórica (%)
Janeiro	26,17	31,69	28,93	27,47	278,55	300,15	59,08	70,64
Fevereiro	24,08	28,78	26,43	25,13	256,72	266,98	57,02	70,72
Março	21,37	27,38	24,38	24,27	220,81	201,18	49,95	72,78
Abril	19,93	26,55	23,24	24,56	195,87	161,06	45,08	69,96
Maio	16,33	21,32	18,82	20,24	144,72	56,74	21,50	68,59
Junho	15,53	18,90	17,22	18,79	125,13	20,50	8,98	67,33
Julho	15,71	17,69	16,70	17,14	127,71	29,43	12,63	71,46
Agosto	17,29	19,74	18,51	17,80	163,75	115,09	38,53	71,03
Setembro	18,13	20,23	19,18	18,33	156,39	149,59	52,44	70,56
Outubro	21,21	26,74	23,98	23,93	205,57	177,64	47,38	72,90
Novembro	24,52	28,99	26,75	24,12	272,29	315,94	63,61	68,63
Dezembro	26,56	30,28	28,42	25,83	283,10	309,91	60,02	68,87
Total	20,57	24,86	22,71	22,30	202,55	175,35	47,46	72,08

Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Os resultados simulados em TRNSYS das temperaturas apresentados na tabela 5, são plotados na figura 17, onde pode-se observar, que a temperatura de entrada do coletor apresenta um mínimo de 15,53 °C e um máximo de 26,56 °C, por outro lado, a temperatura de saída do coletor apresenta uma variação mínima de 17,69 °C e máxima de 31,69°C, a temperatura média variam entre um mínimo de 16,70 °C e um máximo de 28,93°C, resultando em uma temperatura média anual de 22,71 °C. A temperatura ambiente afetada pelas condições meteorológicas, da cidade varia de 17,14 °C a 27,47 °C.

Figura 17: Resultados das temperaturas vs meses.

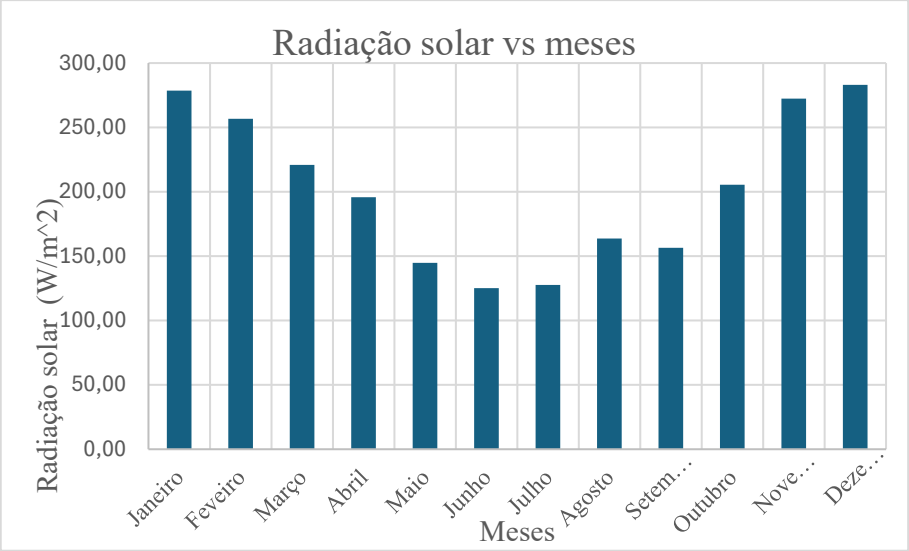


Fonte : Elaborado pelo autor. (2025)

No que respeita aos resultados da radiação global do coletor, apresenta uma radiação global média anual de 202,55 W/m^2, onde irradiação solar apresenta um mínimo de 125,13 W/m^2, e 127,71 W/m^2 no mês de junho e julho afetados por as condições climáticas da cidade, e um máximo de irradiação de 278,55 W/m^2, 283,10 W/m^2nos meses de janeiro e dezembro. A figura 18 mostra os períodos de maior disponibilidade de irradiação solar, onde janeiro a março e outubro a dezembro apresentam maior irradiação solar com valores superiores de 200 W/m^2, por outro lado, de maio a julho, a irradiação solar do coletor é inferior a 150 W/m^2.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

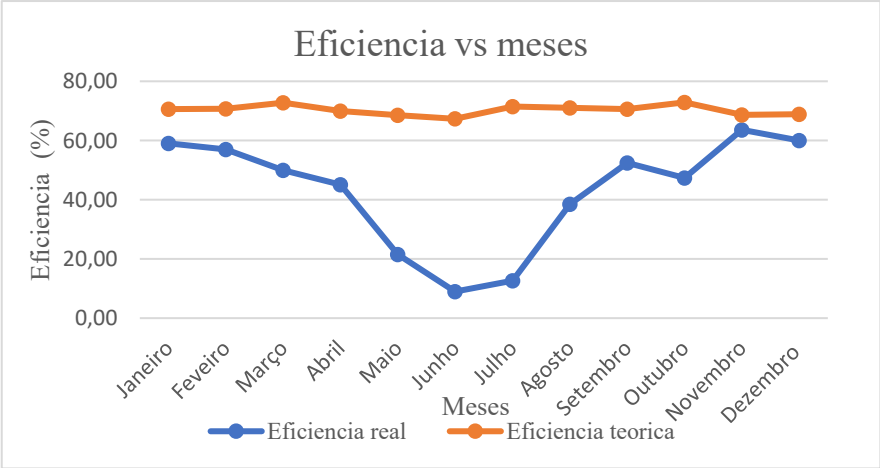
Figura 18: Resultados da Radiação vs meses.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

A figura 19 mostra a curva da eficiência real e teórico em função dos meses, onde a eficiência real foi calculado pela equação 3, onde o coletor solar apresenta uma eficiência inferior a 40% nos meses de inverno (maio, junho, julho e agosto) e mais alto nos meses de verão (de janeiro a abril e setembro a dezembro) com um rango entre 45% e 60%, esses resultados se devem às condições climáticas da cidade. Também foi calculado a eficiência teórica aplicando o modelo teórico de Hottel Whillier Bliss, onde se observar que a curva da eficiência teórica, apresenta um comportamento mais estável, com um rendimento ideal, levando em consideração as perdidas térmicas teórica, a eficiência teórica apresenta uma promedio anual de 72,08%.

Figura 19: Resultados da eficiência vs meses.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Para a cidade de Alvorada do Norte, a tabela 7 apresenta os resultados da simulação do sistema de coletor de placa plana que foram obtidos e analisados mensalmente das temperaturas, da radiação global, do calor útil do coletor e as eficiências reais y teóricas nas condições climatológicas da cidade de Alvorada de Norte calculadas a partir de uma seria de dados. Esses resultados confirmam que, embora simples e de baixo custo, o coletor com tubos apresenta limitação de desempenho devido as condições climáticas da cidade, sendo mais adequado para aplicações de aquecimentos de água em pequenas instalações residenciais ou rurais.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Tabela 7: : Resultados da simulação no TRNSYS da cidade de Alvorada do Norte.

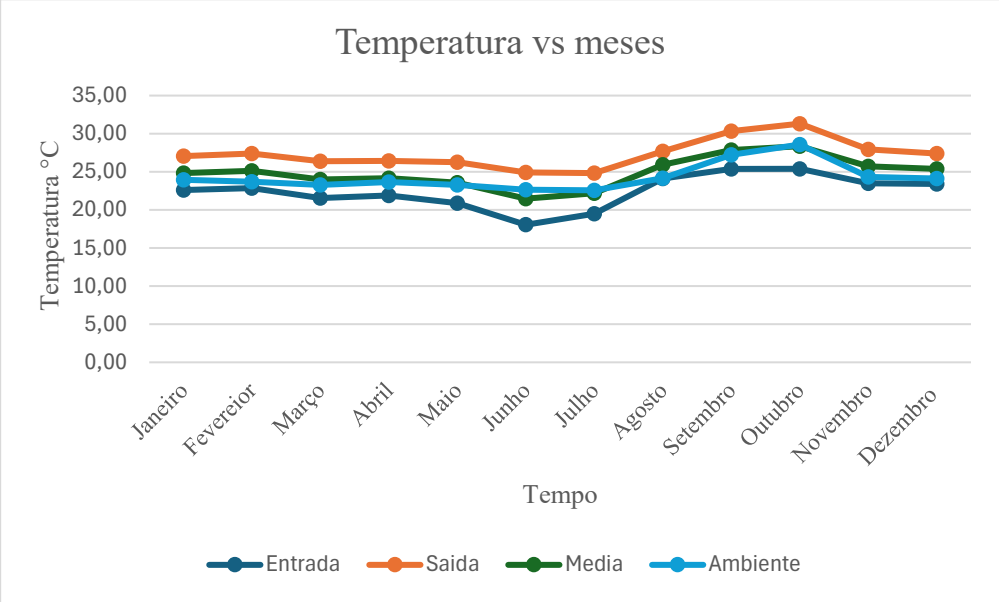
Meses	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Temperatura média (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Radiação solar do coletor (W/m^2)	Calor útil do coletor (W)	Eficiência TRNSYS (%)	Eficiência teórica (%)
Janeiro	22,59	27,06	24,83	23,97	229,26	253,65	60,66	71,32
Faveiro	22,85	27,40	25,13	23,72	242,37	274,55	62,10	70,38
Março	21,57	26,40	23,99	23,30	222,10	229,29	56,60	71,59
Abril	21,89	26,41	24,15	23,66	209,80	209,50	54,75	71,94
Maio	20,86	26,25	23,56	23,28	228,13	234,10	56,26	72,45
Junho	18,05	24,90	21,47	22,67	201,42	165,42	45,03	70,34
Julho	19,51	24,83	22,17	22,57	214,93	229,98	58,66	72,16
Agosto	24,14	27,69	25,91	24,15	257,31	288,80	61,53	69,92
Setembro	25,37	30,34	27,85	27,21	258,07	289,27	61,45	71,88
Outubro	25,39	31,31	28,35	28,58	258,08	288,02	61,18	73,39
Novembro	23,47	27,95	25,71	24,32	247,93	264,39	58,46	70,47
Dezembro	23,39	27,40	25,40	24,11	240,99	270,33	61,50	70,60
Total	22,42	27,33	24,88	24,29	234,20	249,78	58,47	71,88

Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Os resultados simulados no TRNSYS das temperaturas apresentados na tabela 6, são plotados na figura 22, onde pode-se observar, que a temperatura de entrada do coletor apresenta um mínimo de 18,05 °C e um máximo de 25,39 °C, por outro lado, a temperatura de saída do fluido apresenta um valor mínimo de 24,83 °C e a máxima de 31,31°C, a temperatura média que foi calculado mediante a temperatura de entrada e saída, e varia entre um mínimo de 21,47 °C e um máximo de 28,35°C, resultando em uma temperatura média anual de 24,88 °C. A temperatura ambiente afetada pelas condições meteorológicas, da cidade varia de 22,57 °C a 28,58 °C.

Figura 20: Resultados das temperaturas vs meses.

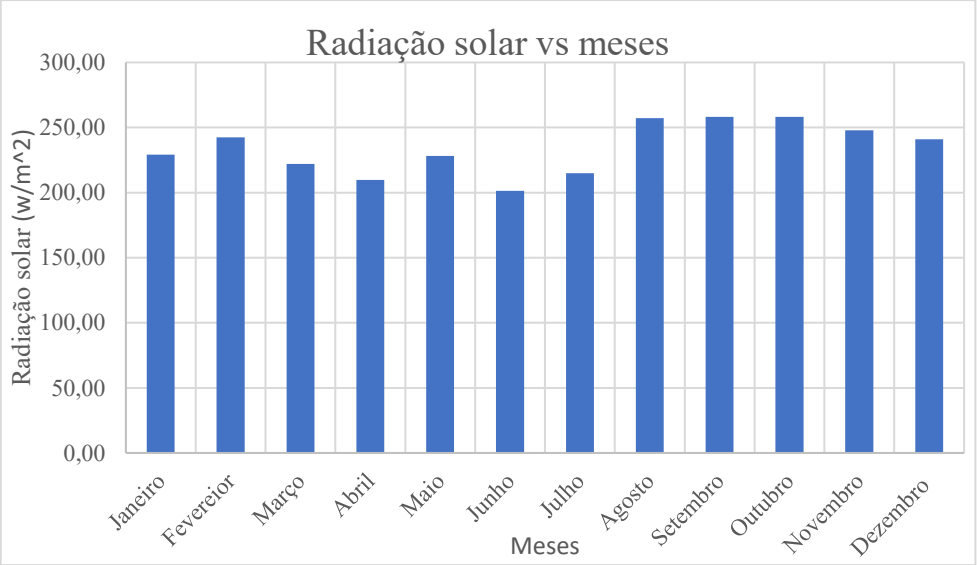


Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Os resultados obtidos da irradiação global do coletor, apresenta uma irradiação média anual de 234,20 W/m^2, onde irradiação solar apresenta um mínimo de 201,42 W/m^2, e 209,80 W/m^2 no mês de abril e junho afetados por as condições climáticas da cidade, e um máximo de irradiação de 258,08 W/m^2, 258,07 W/m^2 nos meses de setembro e outubro. A figura 21 mostra os períodos de maior disponibilidade de irradiação solar, onde janeiro a dezembro apresentam maior irradiação solar com valores superiores de 200 W/m^2.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

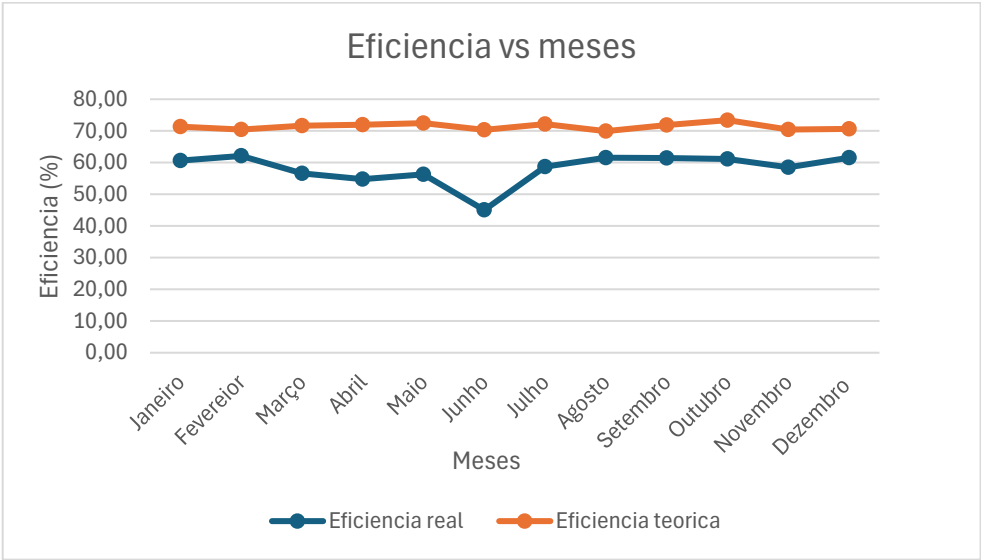
Figura 21: Resultados da Radiação vs meses.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

A figura 22 mostra a curva da eficiência real e teórico em função dos meses, onde a eficiência real foi calculado pela equação 3, onde o coletor solar apresenta uma eficiência mínima de 45,03% no mês, junho, e mais alto nos meses (de janeiro a maio e julho a dezembro) com um rango entre 56% e 62%, esses resultados se devem às condições climáticas da cidade. Também foi calculado a eficiência teórica aplicando o modelo teórico de Hottel Whillier Bliss, onde se observar que a curva da eficiência teórica, apresenta um comportamento mais estável, com um rendimento ideal, levando em consideração as perdidas térmicas teórica, a eficiência teórica apresenta uma promedio anual de 71.88%.

Figura 22: Resultados da eficiência vs meses.



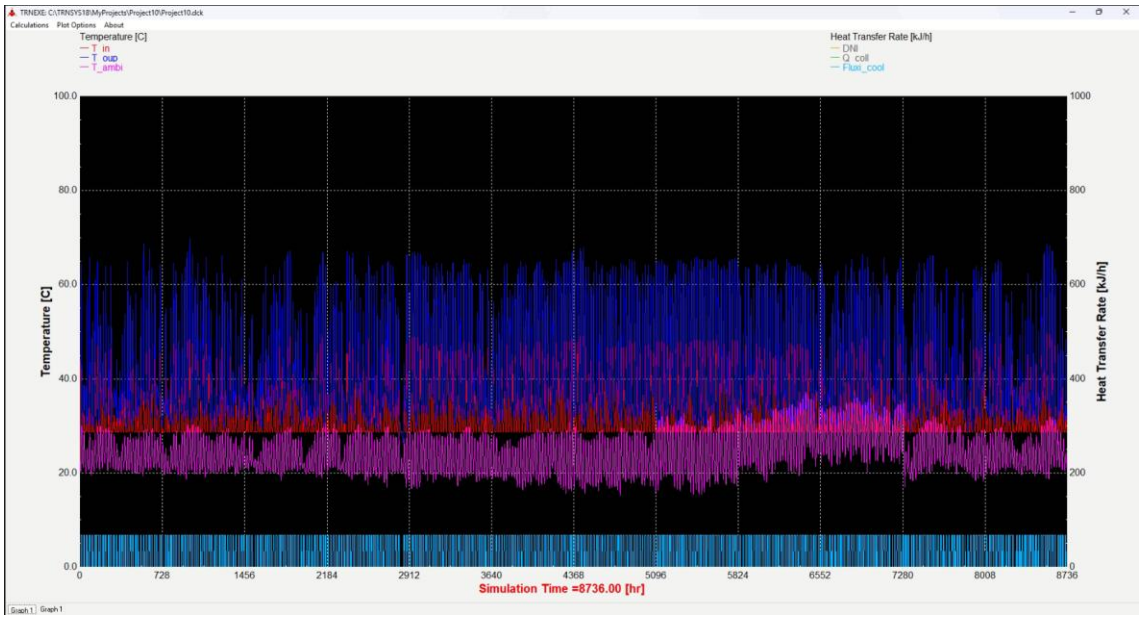
Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

4.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DO COLETOR CALHA PARABÓLICA (PTC)

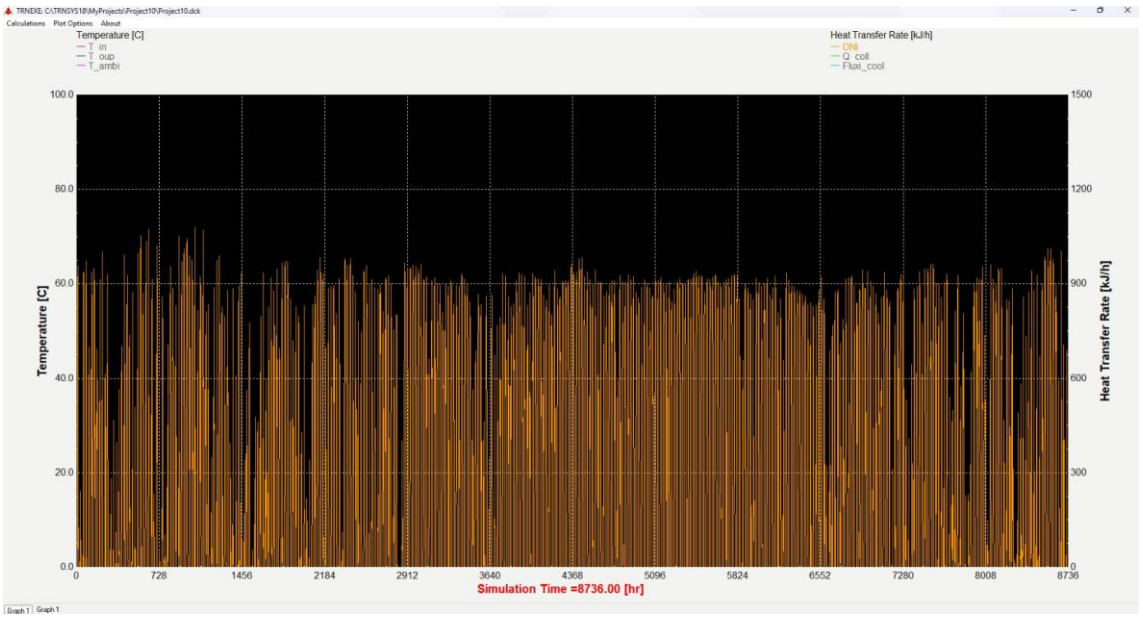
A simulação no TRNSYS para o modelo solar de calha parabólica foi aplicado a mesma metodologia de simulação que foi aplicada para o modelo de placa plana, para as mesmas cidades.

Figura 23: Simulação de sistema em TRNSYS.



Fonte: TRNSYS 18. (2025)

Figura 24: Simulação de sistema em TRNSYS.



Fonte: TRNSYS 18. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

4.2.1 Validação Para O Protótipo PTC De Pequeno Porte

Para concluir a análise térmico do sistema do coletor de calha parabólica, esta seção apresenta um estudo de caso por meio da simulação e comparação com um protótipo experimental de baixo custo (Fiamonzini, 2022). Estes ensaios foram realizados na cidade de Foz do Iguaçu no dia 23/10/2021 entre as 9h e 16h, com uma temperatura de ambiente de 25° usando a radiação solar direta (DNI) de 905 W/m^2 usando água como fluido de trabalho. Onde o coletor ficou alinhado na direção do eixo norte-sul e localizado nas coordenadas S 25.43816, O 54.59679. Na tabela 8 são apresentados os resultados obtidos, do ensaio experimenta e da simulação computacional.

Tabela 8: Resultado da validação do protótipo (Fiamonzini)

Resultados experimental			**Simulado TRNSYS**	
Hora	**Vazão mássica (kg/s)**	**Eficiência %**	**Eficiência %**	**Erro %**
09:00:00	0,0192	28,70	27,400	1,350
10:00:00	0,0192	34,40	27,300	7,082
11:00:00	0,0192	26,51	26,500	0,007
12:00:00	0,0192	30,06	26,200	4,420
13:00:00	0,0192	27,50	35,300	7,796
14:00:00	0,0192	30,01	32,900	2,808
15:00:00	0,0192	28,60	32,100	3,472
16:00:00	0,0192	27,10	30,000	2,876

Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Assim foi possível realizar uma comparação entre o protótipo experimental e a simulação computacional, as eficiências do coletor pode ser comparada na tabela 9 com sistemas semelhantes aos encontrados na literatura.

Tabela 9: Comparação de rendimento térmico entre diferentes coletores.

Autor	**Eficiência**	**Características básicas**
Torres (2020)	52,38 % (max)	Refletor de alumínio polido e tubo de cobre sem envelope de vidro;
Coccia (2025)	65,00 % (max)	Refletor de aço inoxidável, tubo de alumínio com envelope de vidro na evacuado;
Jaramillo (2013)	67,00 % (max)	Refletor em película refletiva e tubo em cobre com envelope de vidro;
Coletor proposto	36,50 % (max)	Refletor em película refletiva e tubo em cobre sem cobertura;

Fonte: Adaptado de FIAMONZINI (2022).

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

4.2.2 Resultados do caso estudo do sistema de coletor solar de tipo calha parabólico (PTC)

Para a cidade de Foz do Iguaçu, a tabela 10 apresenta os resultados da simulação do sistema de coletor solara do tipo calha parabólica que foram obtidos e analisados mensalmente das temperaturas, radiação, calor útil do coletor e as eficiências reais y teóricas nas condições climatológicas da cidade de Foz do Iguazú calculadas a partir de uma seria de dados. Esses resultados confirmam que, embora simples e de baixo custo, o coletor apresenta limitação de desempenho em relação, sendo mais adequado para aplicações de aquecimentos de água em pequenas instalações residenciais ou rurais.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Tabela 10: Resultados da simulação no TRNSYS da cidade de Foz do Iguaçu.

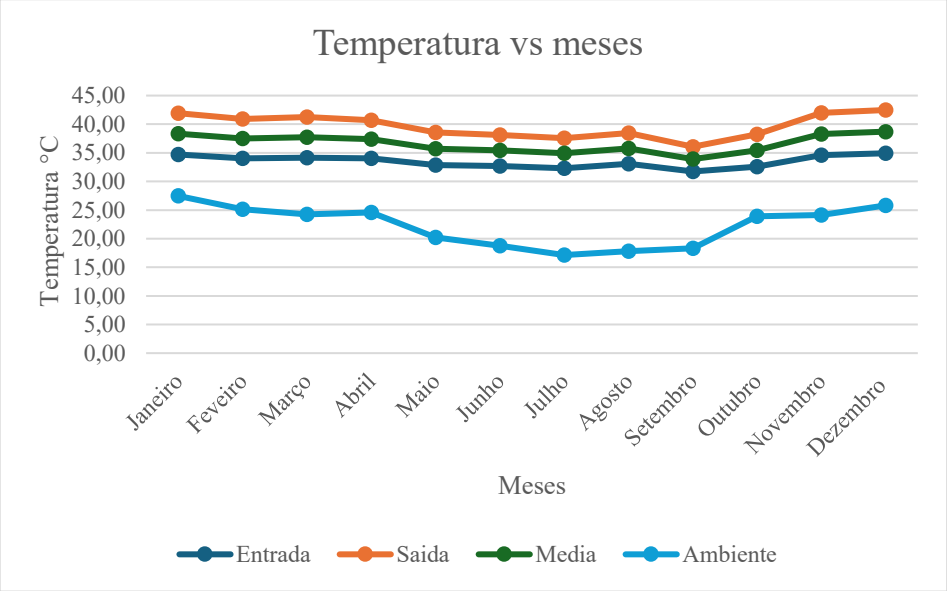
Meses	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	ΔT (°C)	Temperatura média (°C)	Temperatura ambiente (°C)	DNI (W/m²)	Vazão mássica (Kg/s)	Eficiência real (%)
Janeiro	34,73	41,95	7,22	38,34	27,46	252,38	0,0087	47,63
Fevereiro	34,06	40,91	6,85	37,48	25,13	224,26	0,0080	46,25
Março	34,17	41,25	7,08	37,71	24,27	228,56	0,0082	48,14
Abril	34,02	40,71	6,70	37,36	24,56	224,70	0,0076	43,04
Maio	32,89	38,57	5,69	35,73	20,24	174,61	0,0063	38,97
Junho	32,71	38,11	5,40	35,41	18,79	164,10	0,0065	40,55
Julho	32,31	37,57	5,25	34,94	17,14	146,87	0,0060	40,54
Agosto	33,07	38,46	5,40	35,77	17,80	181,28	0,0067	37,98
Setembro	31,74	36,07	4,33	33,90	18,33	120,74	0,0054	36,50
Outubro	32,57	38,25	5,68	35,41	23,93	157,03	0,0064	43,86
Novembro	34,60	41,96	7,36	38,28	24,12	247,59	0,0087	49,25
Dezembro	34,92	42,48	7,56	38,70	25,83	262,18	0,0090	49,41
Total	33,48	39,69	6,21	36,59	22,30	198,69	0,0073	43,27

Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Os resultados simulados no TRNSYS, as temperaturas apresentados na tabela 10, são plotados na figura 25, onde pode-se observar, que a temperatura de entrada do coletor apresenta um mínimo de 31,74 °C e um máximo de 34,96°C, por outro lado, a temperatura de saída do coletor apresenta uma variação mínima de 36,07 °C e máxima de 42,48°C, a temperatura média variam entre um mínimo de 33,90 °C e um máximo de 38,70 °C, resultando em uma temperatura de entrada média anual de 33,48 e uma temperatura de saída média anual de 39,69 °C, com uma variação de temperatura de 6,21 °C. Por outro lado, a temperatura ambiente afetada pelas condições meteorológicas, da cidade varia de 17,14 °C a 27,47 °C.

Figura 25: Resultados das temperaturas vs meses.

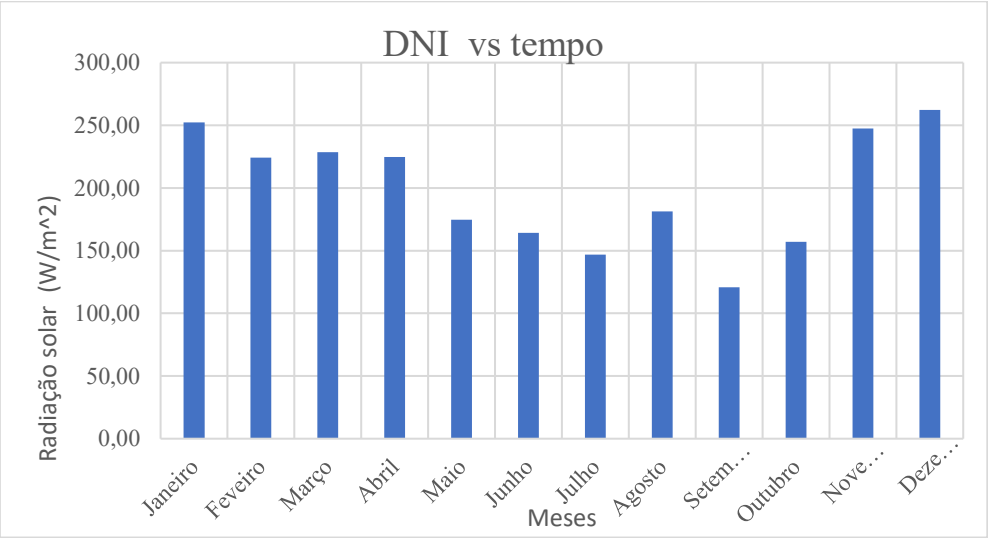


Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Os resultados obtido DNI (Irradiação Solar Direta Normal) do coletor parabólico, apresenta uma DNI média anual de 198,69 W/m^2, onde o coletor parabólico apresenta um DNI mínimo de 120,74 W/m^2, e 146,10 W/m^2 no mês de setembro e julho afetados por as condições climáticas da cidade, e um máximo de DNI de 262,18 W/m^2, 252,38 W/m^2nos meses de janeiro e dezembro. A figura 26 mostra os períodos de maior disponibilidade de irradiação solar, onde janeiro a abril e outubro a dezembro apresentam maior irradiação solar com valores superiores de 200 W/m^2, por outro lado, de maio a setembro, a irradiação solar do coletor é inferior a 200 W/m^2.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

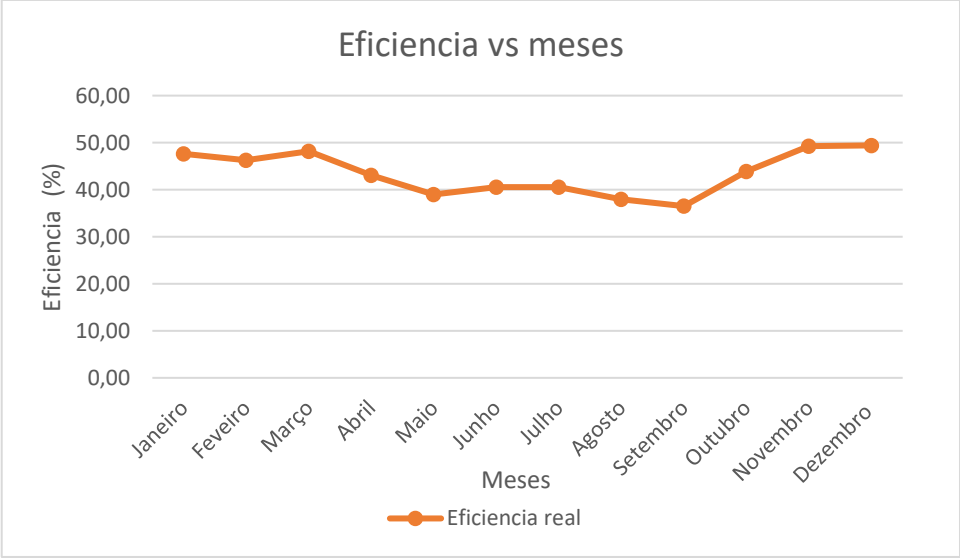
Figura 26: Resultados DNI vs meses.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

A figura 27 mostra a curva da eficiência real em função dos meses, onde a eficiência real foi calculado pela equação 10, onde o coletor solar apresenta uma eficiência inferior a 43% nos meses de inverno (maio, junho, julho, agosto e setembro) e mais alto nos meses de verão (de janeiro a abril e outubro a dezembro) com um rango maior que 43,50%, esses resultados se devem às condições climáticas da cidade. Onde o coletor apresenta uma eficiência anual promedio de 43,27% que foram simulados para a cidade do Foz Iguazú.

Figura 27: Resultados da eficiência vs meses.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Para a cidade de Alvorada do Norte a tabela 11 apresenta os resultados da simulação do sistema de coletor solar de tipo calha parabólico que foram obtidos e analisados mensalmente das temperaturas, a radiação e as eficiências mensais reais nas condições climatológicas da cidade de Alvorada de Norte calculadas a partir de uma seria de dados. Onde o coletor ficou alinhado na direção do eixo norte-sul e localizado nas coordenadas S 14.600, O 46.649. Esses resultados confirmam que, embora simples e de baixo custo, o coletor sem tubos apresenta limitação de desempenho, sendo mais adequado para aplicações de aquecimentos de água em pequenas instalações residenciais ou rurais

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Tabela 11: Resultados da simulação no TRNSYS da cidade de Alvorada do Norte.

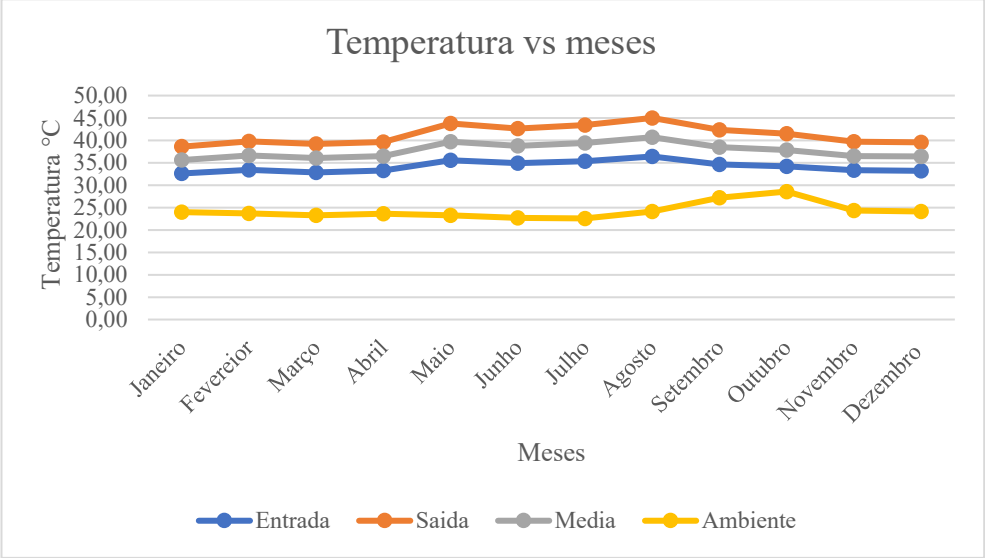
Meses	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	ΔT (°C)	Temperatura média (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Radiação solar do coletor (W/m^2)	Vazão mássica (kg/s)	Eficiência real (%)
Janeiro	32,60	38,60	6,00	35,60	23,97	153,26	0,00692	51,55
Fevereiro	33,43	39,80	6,37	36,61	23,72	192,31	0,00692	43,63
Março	32,87	39,21	6,34	36,04	23,30	165,87	0,00692	50,36
Abril	33,30	39,62	6,32	36,46	23,66	188,71	0,00692	44,14
Maio	35,56	43,78	8,22	39,67	23,28	294,57	0,00692	36,77
Junho	34,93	42,66	7,73	38,80	22,67	263,57	0,00692	38,62
Julho	35,37	43,42	8,06	39,39	22,57	284,16	0,00692	37,37
Agosto	36,40	45,01	8,61	40,70	24,15	334,45	0,00692	33,91
Setembro	34,66	42,36	7,70	38,51	27,21	250,41	0,00695	40,68
Outubro	34,23	41,47	7,24	37,85	28,58	228,46	0,00695	41,91
Novembro	33,32	39,72	6,40	36,52	24,32	186,76	0,00695	45,29
Dezembro	33,23	39,59	6,36	36,41	24,11	182,83	0,00695	46,03
Total	34,16	41,27	7,11	37,71	24,29	227,11	0,00693	41,31

Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Os resultados simulados no TRNSYS, das temperaturas apresentados na tabela 10, são plotados na figura 28, onde pode-se observar, que a temperatura de entrada do coletor apresenta um mínimo de 32,60 °C no mês de janeiro e um máximo de 36,40°C no mês de agosto, por outro lado, o coletor apresenta uma temperatura mínima de saída de 38.60 °C e uma temperatura máxima de saída de 45,01°C, a temperatura média variam entre um mínimo de 35,60 °C e um máximo de 40,70°C, o coletor apresenta uma variação de temperatura entre 6,00°C a 8,61°C como mostra na tabela 10. Por outro lado, a temperatura ambiente afetada pelas condições meteorológicas, da cidade varia de 22°C a 28,58 °C.

Figura 28: Resultados das temperaturas vs meses.

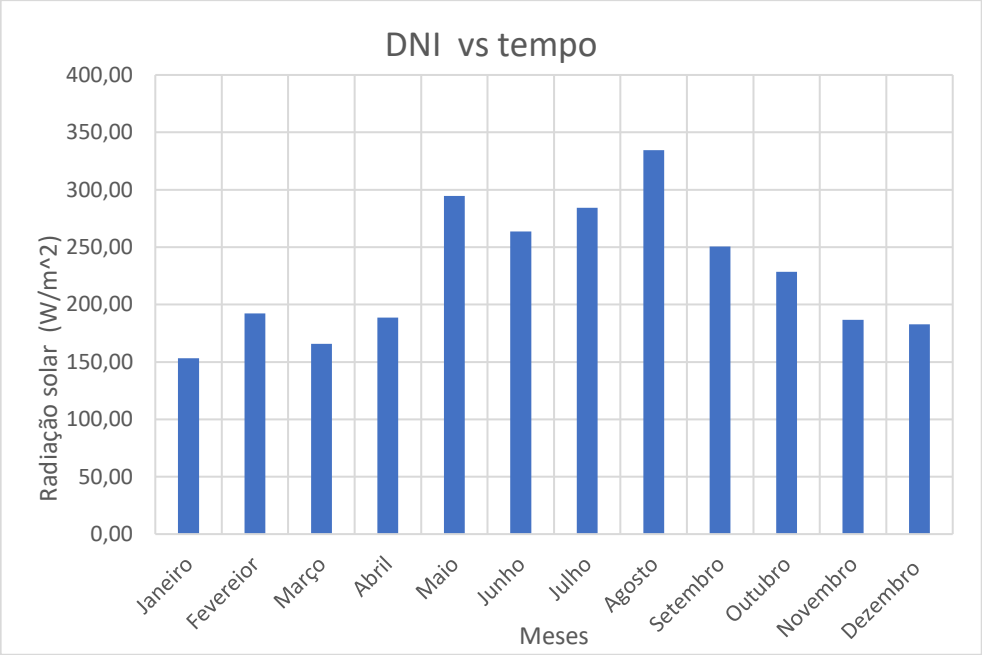


Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Os resultados da simulação para a cidade de Alvorada do norte foram obtidos o DNI (Irradiação Solar Direta Normal) do coletor parabólico, apresenta uma média anual de 227,11 W/m^2, onde o coletor parabólico apresenta um DNI mínimo mensal de 153,26 W/m^2, no mês de janeiro e no máximo mensal de 334,45 W/m^2 no mês de agosto. A figura 29 mostra os períodos de maior disponibilidade de irradiação solar.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

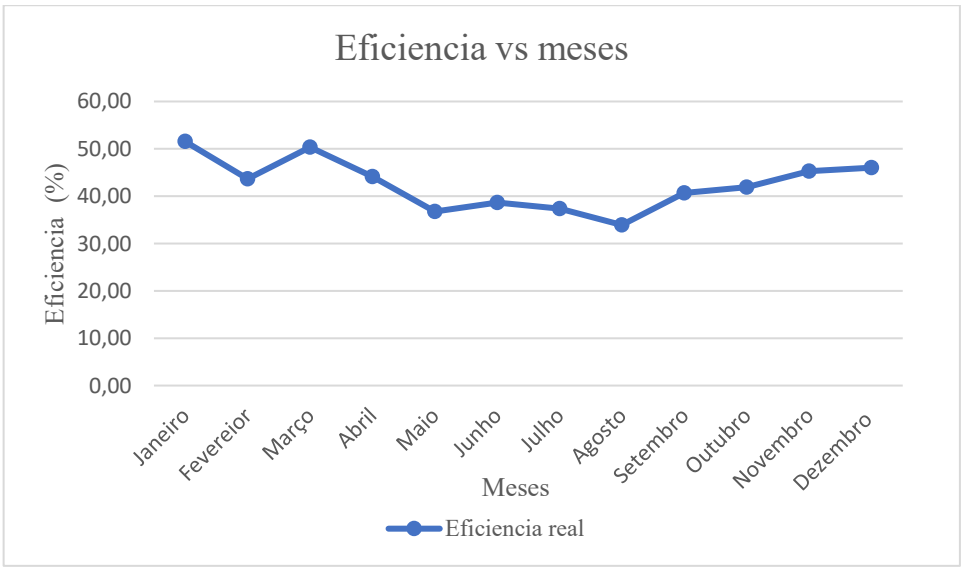
Figura 29: Resultados DNI vs meses.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Os resultados da eficiência térmica do coletor são apresentados nas figuras 30, onde mostra a curva da eficiência real em função dos meses, onde a eficiência real foi calculada pela equação 10, onde o coletor solar apresenta uma eficiência mínima no mês de agosto 33,91% e um máximo no mês de janeiro de 51,55 %, esses resultados se devem às condições climáticas da cidade. Onde o coletor apresenta uma eficiência anual promedio de 41,31% que foram simulados para a cidade do Alvorada do Norte.

Figura 30: Resultados da eficiência vs meses.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025)

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho realizado, foram obtidas as seguintes conclusões:

- Neste trabalho, é analisado e comparado um sistema de coletores solares planos (FPC) e parabólicos (PTC), utilizando o software TRNSYS, sob as condições de operação das cidades de Foz do Iguaçu-Paraná e Alvorada do Norte-Goiás (Brasil), numa base anual. Os objetivos detalhados, como a explicação teórica dos componentes, a simulação da eficiência térmica, a comparação com dados obtidos experimentalmente e a identificação das variáveis de operação, foram alcançados de forma satisfatória.
- Os resultados da validação para os sistemas propostos mostram um boa correlação entre os resultados da simulação e os dados reais, donde o sistema de placa plana apresenta um erro de 5% aproximadamente e um erro de 6,35% para o sistema de coletor parabólico respectivamente.
- A simulação no TRNSYS dos sistemas de coletores solares foi realizada para um ano em que foram obtidos dados sobre a temperatura da água e a irradiação solar. Os principais resultados obtidos foi a temperatura média da água para a cidade de Foz do Iguaçu, FPC 22,71°C, PTC 36,59°C, e FPC 24,88°C, PTC 37,71°C para a cidade de Alvorada do Norte. As eficiências calculadas para os coletores mencionados são FPC 47,46%, PTC 43,27% e FPC 58,74%, PTC 41,37%, respectivamente.
- Com os modelos realizados, simulou-se o comportamento do sistema. Os modelos permitiram visualizar as temperaturas da água e as eficiências do sistema concluindo que o sistema de placa plana simulado para a cidade de Foz do Iguaçu apresenta um rendimento muito baixo no inverno (menor de 20% em junho e julho), devido à menor irradiação solar e temperatura mais frias. Já a cidade de Alvorada do Norte apresenta um rendimento aceitável mesmo no inverno (maior de 40%), devido a maior estabilidade da irradiação solar e temperaturas mais elevadas.
- Os resultados demonstraram que o TRNSYS é uma ferramenta eficaz para a predição do comportamento térmico dos coletores solares, apresentado boa concordância com os dados experimentais. Além disso, observou-se que o coletor parabólico obteve melhor desempenho em regimes de alta irradiação, enquanto o coletor plano apresentou maior estabilidade térmica em condições de menor isolação. Os estudos contribuem para a

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

compreensão e otimização de sistemas solares térmicos, auxiliares no dimensionamento e seleção de tecnologias adequadas a diferentes aplicações energéticas.

- A simulação realizado no TRNSYS para o PTC foi validado por meio da comparação com os resultados experimentais obtidos no ensaio conduzido em Foz do Iguaçu no dia 23/10/2021, entre 9h e 16h. A concordância observada com a simulação pode ser atribuída a alguns fatores:
  a) A simulação no TRNSYS adotou o valor de DNI=905 W/m^2 nominal (valor adotado pela simulação experimental através de um modelo teórico, já que não foram adquiridos pirômetros);
  b) O tracking não foi habilitado no TRNSYS (Type 135, mode 1=fixed surface); no entanto estes valores calculavam os valor nominais, já que o IAM era igual a 1 e DNI=905 W/m^2, idealizando parcialmente o cálculo da taxa de calor média. Assim de forma aproximada os valores de erro médio conforme apresentadas em tabelas se mantem dentro de uma margem de erro aceitáveis.
- Sem embargo, os resultados obtidos no TRNSYS para o PTC de pequeno porte nas cidades simuladas (Foz do Iguaçu e Alvorada do Norte), ainda requerem validações quantitativas adicionais, pois não representam de forma fiel o comportamento físico esperado. Em particular
    a) Deveria ser levado em conta o tracking com a setagem modelo 2 ou modelo 3 (modelo 2 = a superfície gira em torno de um eixo vertical para acompanhar o sol, modo 3= a superfície gira em torno de um eixo fixo (definido pelo utilizador), modo 4= a superfície de 2 eixos acompanha de forma que a radiação do feixe seja sempre normal a superfície, conforme o manual TRNSYS;
    b) O DNI dessa vez é variável e o IAM tem que ser setada em função das características óticas e geométricas do coletor PTC (IAM ≠ 1);
    c) Por apresentar clima tropical seco, latitude mais próximo ao Equador e com maior altura solar, Alvorada do Norte apresenta valores de Irradiação Direta DNI superior aos de Foz do Iguaçu (clima subtropical úmido). Dessa forma, as eficiências dos coletores PTC nessa cidade deveriam ser maiores em média do que as obtidas em Foz do Iguaçu;
    d) Ale disso, quando se utiliza o modelo =1 fixed surface, as eficiências obtidas para essas cidades deveriam ser significativamente menores do que as obtidas na simulação do presente trabalho, devido as perdas óticas e geométricas associadas à ausência de tracking, bem como à ausência de tubo de vidro

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

concêntrico (não evacuado), as quais aumentam ainda mais as perdas térmicas do sistema;

e) Finalmente, recomenda-se incorporar as considerações mencionados acima na simulação e aprimoramento da instrumentação do PTC experimental, especialmente ao uso de pirômetros, visando dessa forma validações ainda mais precisas.

TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, recomenda-se as seguintes atividades:

- Realizar simulações com outros modelos de coletores solares e outros fluidos térmicos alternativos além de água como óleo, nano fluidos ou fluidos de mudança de fase etc.;
- Realizar simulações com outros softwares livres como o OpenModelica, a modo de comparação;
- Incorporar um sistema de rastreamento solar (tracking) para avaliar o impacto dos mecanismos de rastreamento uniaxial ou biaxial nos coletores PTC, quantificando os ganhos de eficiência em diferentes latitudes e estações do ano;
- Quantificar os custos de instalações dos campos solares de pequeno porte, para aplicações rurais e avaliar sua viabilidade técnica- econômica nas diferentes regiões do Brasil.
- Implementar bancadas didáticas experimental em escala reduzida, integrando FPC e PTC, para comparação direta com os dados simulados e uso em disciplinas de Engenharia de Energias.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 15569: **Sistema de aquecimento solar de água em circuito elétrico direto: projeto e instalação.** Rio de Janeiro, 2020.

AL-ADDOUS, M. et al. Combined concentrated solar power plant with low-temperature multi-effect distillation. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 38, n. 5, p. 1831–1853, mar. 2020.

ALLOUHI, A. et al. Optimization of solar water heaters for rural areas in Morocco. **Energy Reports**, v. 4, p. 191-200, 2018b.

ANDRADE, António Carlos da Costa. **Modelação de recetores solares térmicos volumétricos de matriz sólida com base em modelos de ordem reduzida**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade de Évora, Évora. Disponível em: https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/30104/1/Mestrado-Engenharia_da_Energia_Solar-Antonio_Carlos_da_Costa_Andrade.pdf. Acesso em: 02 jun. 2025.

BARBOSA, E. de S. **Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreamento de concentradores cilíndrico-parabólicos**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

BATAYNEH, W. et al. Performance analysis of a dual-axis solar tracking system. **Energy Conversion and Management**, v. 185, p. 1-10, 2019.

BELLOS, E. et al. Exergy analysis of solar parabolic trough collectors with various types of nanofluids. **Energy Conversion and Management**, v. 147, p. 433-446, 2017.

BERCHT, M. P. **Simulação de sistema de geração de calor com coletores de calha parabólica para processo industrial no Rio Grande do Sul**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/235808/001137067.pdf?sequence=1. Acesso em: 1 jul. 2025.

BINOTTI, M. et al. Performance analysis of a stationary concentrating solar collector. **Energy Procedia**, v. 57, p. 3069-3078, 2014.

BOUHAL, A. et al. Performance evaluation of parabolic trough solar collector for different working fluids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 138-152, 2018.

BUONOMANO, A. et al. Optimization of solar tracking systems for concentrating solar power plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 473-488, 2018.

CABRAL, Lorena Oliveira. **Análise da influência de parâmetros de projeto no desempenho de coletores solares de tubos evacuados**. 2020. Monografia (Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2895/1/MONOGRAFIA_An%C3%A1liseInflu%C3%AAnciaPar%C3%A2metros.pdf. Acesso em: 1 jul. 2025.

CAETANO, Erick Izidoro et al. **Um Controlador Inteligente para Otimização de Sistemas de Aquecimento de Água com Coletores Solares**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

(Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/248734/TCC_Erick_Izidoro_Caetano_FINAL.pdf?sequence=1. Acesso em: 1 jul. 2025.

CARVALHO, Filipe Rocha de; SIONEK, Mirella Cristina. **Análise da eficiência de um coletor solar plano**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10355/3/CT_COEME_2014-2_05.pdf. Acesso em: 03 jun. 2025.

CAVALCANTE, Rafael Leandro de Paiva. **Estudo de um coletor solar para aquecimento de água com grade absorvedora em duas configurações: com e sem aletas**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/53791/1/ColetorSolar__Rafael__2023.pdf. Acesso em: 1 jul. 2025.

COSTA, Bruno Maia da. **Tratamento de tubos de alumínio por PEO: uma alternativa para o desenvolvimento de superfícies seletivas de radiação empregadas em coletores solares fototérmicos**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/8816/1/BrunoMC_DISSERT.pdf. Acesso em: 1 jul. 2025.

COSTA, Emanuel Hespanhol. **Estudo de viabilidade econômica para implantação de um sistema de aquecimento solar a vácuo para uma residência**. 2020. Monografia (Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

DA SILVA, Ailton Gonçalves; DE LIMA JÚNIOR, Claudemiro; GÓMEZ-MALAGÓN, Luis Arturo. TRATAMENTO HIDROTÉRMICO DE MANGAS AUXILIADO POR ENERGIA SOLAR TÉRMICA. In: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**, 2022, Recife. Anais [...]. Recife: ABENS, 2022. p. 1-10.

DA SILVA, Rui Carvalho. **Análise e caracterização experimental de coletores solares de concentração CPC**. 2021. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, Porto, 2021. Disponível em: https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/136671/2/503943.pdf. Acesso em: 1 jul. 2025.

DALLEGRAVE, Cleber Pizzatto. **Desenvolvimento de um coletor solar flexível e de baixo custo**. 2020. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, 2020.

DE OLIVEIRA BUSSON, Bruna et al. SIMULAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA E DESEMPENHO TÉRMICO DE TROCADOR DE CALOR PARA MÓDULO FOTOVOLTAICO. In: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**, 2022, Recife. Anais [...]. Recife: ABENS, 2022. p. 1-10.

DE OLIVEIRA CHAVES, Yasmim Aparecida. **Análise de Viabilidade de um Sistema Híbrido Alimentado por Biogás e Energia Solar**. 2020. Dissertação de Mestrado (Engenharia do Ambiente) – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal.

GARRUÇO, Manuel Trindade Silva Paraiba. **Sistema solar térmico com armazenamento sazonal**. 2022. Dissertação de Mestrado (Energia e Ambiente) – Instituto Superior Técnico,

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2022. Disponível em: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/844781491799757/Dissertacao_Manuel_Garruco.pdf. Acesso em: 1 jul. 2025.

GONÇALVES, R. S.; PALMERO-MARRERO, A. I.; OLIVEIRA, Armando C. **Análise de diferentes modelos de radiação solar na aplicação do método F-Chart**. 2020. Disponível em: https://repositorio.lneg.pt/bitstreams/9c65c0d3-9bc7-4d27-bf95-b369f41b5472/download. Acesso em: 1 jul. 2025.

HAFEZ, A. Z. et al. Performance evaluation of stationary and tracking solar collectors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 320-332, 2018a.

JÚNIOR, Walmir Nunes Vieira; LIMA, Frederico Romagnoli Silveira. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO E TÉRMICO ASSOCIADO A BOMBA DE CALOR SIMULADO NO TRNSYS. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 15, n. 1, 2023.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 3, p. 231-295, 2004.

KIM, J. H. et al. A review on solar thermal collectors for medium temperature applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 1-14, 2013.

LIU, M. et al. Review on solar thermal process heat technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 1-15, 2014.

LV, S. et al. Optimal tilt angle and orientation for solar collectors in China. **Renewable Energy**, v. 120, p. 280-288, 2018.

MAATALLAH, T. et al. Performance analysis of a stationary concentrating solar collector. **Energy Conversion and Management**, v. 159, p. 1-10, 2018.

MEKHILEF, S. et al. Solar energy collectors and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 1-14, 2011.

MENDONÇA, S. P. **Análise de desempenho de um coletor de calha parabólica para diferentes tubos absorvedores**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/44997/3/2019_dis_spmendonca.pdf. Acesso em: 1 jul. 2025.

MIGUEL, Lucas Ferreira Santos. **Simulação 3D computacional de um coletor solar comercial de placa plana**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em: http://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/33449/1/Simula%C3%A7%C3%A3o3DComputacional.pdf. Acesso em: 1 jul. 2025.

NAIK, P. S. et al. Solar thermal industrial process heat: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1007-1020, 2017.

NAVUNGO, Alberto et al. Contribuição de um grupo de colectores solares térmicos no aquecimento de água doméstica. **EXPLORANDO**, p. 6, 2024. Disponível em: https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/6892/TCC%20Anderson%20Fernando%20Restelato.pdf. Acesso em: 1 jul. 2025.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

OLIVEIRA, Lucas Santos. **Estudo numérico da transferência de calor em cavidades preenchidas com materiais de mudança de fase**. 2025. Tese de Doutorado. [sn], [s.l.]. Disponível em: https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=583234&tipoMidia=0. Acesso em: 02 jun. 2025.

ORTUNO, Katia Medrano. **Simulação numérica de uma usina solar com concentradores do tipo calha parabólica integrados a um ciclo combinado na região sul da Bolívia**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energia) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2023.

PELAY, V. et al. Thermal energy storage for concentrated solar power plants: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 138-152, 2017.

PENNA, Luís Eduardo Soares. **Análise comparativa de eficiência e aplicabilidade entre coletores solares planos e coletores de tubo evacuado para emprego residencial**. 2021. Monografia (Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021. Disponível em: http://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/4053/6/MONOGRAFIA_AnaliseComparativaEficiencia.pdf. Acesso em: 1 jul. 2025.

SCHNEIDER, Alexandre. **Estudo de um coletor solar de tubo a vácuo com baixas inclinações através de CFD e proposta de correlações de transferência de calor**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/USIN_b49d513d5422ddd2a971a37386f33e33. Acesso em: 1 jul. 2025.

SOULIOTIS, M. et al. Experimental and numerical investigation of an integrated collector storage solar water heater. **Energy Conversion and Management**, v. 136, p. 1-10, 2017.

SWIATEK, D. et al. Performance analysis of an integrated collector storage solar water heater. **Energy Conversion and Management**, v. 91, p. 1-10, 2015.

TAVARES, Luan de Oliveira. **Avaliação experimental do desempenho térmico de um coletor solar do tipo placa plana**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/36026/1/avaliacaoexperimentalcoletorsolar.pdf . Acesso em: 03 jun. 2025.

WEI, X. et al. A review of thermal energy storage technologies for concentrating solar power plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 1007-1020, 2018.

PATANKAR, Suhas V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

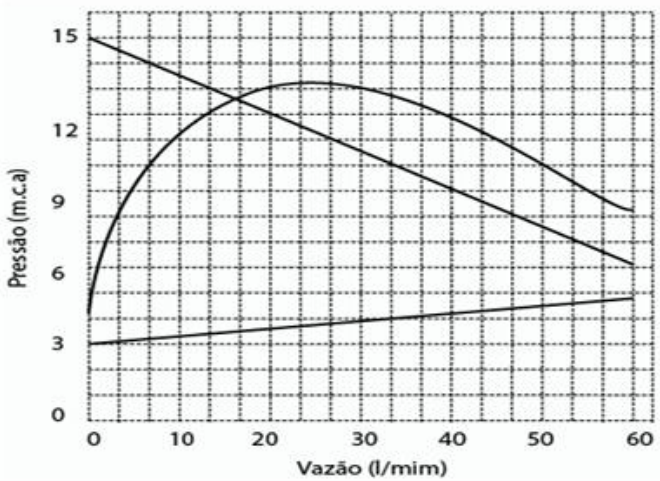
ANEXOS

Anexo 1

2.3 FICHA TÉCNICA

Modelo	TP 120 G1 BRONZE 350W 127v	TP 120 G1 BRONZE 350W 220v
Potência (W)	350	350
Tensão	127V	220V
Corrente de Operação (A)	2,75	1,60
Sistema de Acionamento	Fluxostato	Fluxostato
Vazão máxima (l/min)	60	60
Vazão (l/min)	2	2
Pressão máxima (m.c.a)	18	18
Peso (kg)	5,6	6,6
Conexões (pol)	1" acompanha flange de redução de 3/4"	1" acompanha flange de redução de 3/4"
Dimensões (LxAxP) (mm)	193x180x172mm	193x180x172mm
Temperatura máxima (ºC)	90	90
Classe de proteção	IP 44	IP 44

2.4 GRÁFICO VAZÃO X PRESSÃO



Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Anexo 2

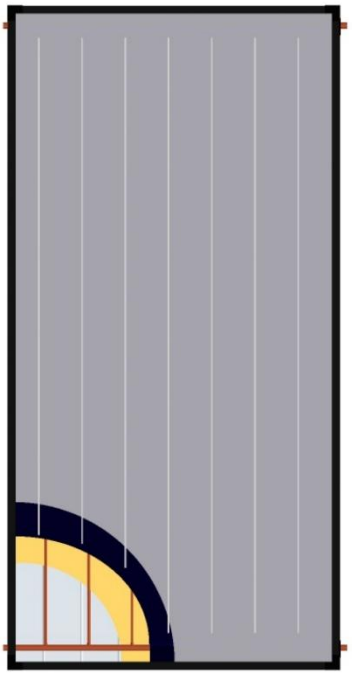
Technical Information

FPC-E20 Solar Collector

V1. Feb. 2018

Product Name: FPC-E20 Flat Plate Collector

Part Code: FPC-E20



Applications

The Apricus FPC-E20 flat plate collector is suitable for residential or commercial domestic hot water projects.

The choice of material and design aspects can greatly affect not only the solar thermal performance but also the reliability when operating in many varied environmental conditions. Apricus has chosen only the highest quality materials to ensure reliable, efficient operation and collector longevity.

Features

- High efficiency BlueTec energy AL solar absorber
- 25mm hailstone resistance tempered glass cover
- High transparency solar glass
- Harp style riser arrangement compatible with direct flow, closed loop and drain-back systems.
- Suitable for portrait or landscape orientation

Materials of Construction

Absorber:	0.3mm BlueTec solar AL
Absorber emittance:	5%±2%
Absorber absorption:	95%±2%
Header:	⌀22 x 0.8mm
Risers:	⌀10 x 0.7mm
Riser spacing:	120mm (total of 7 risers)
Glass:	3.2mm 92% Transmittance
Rubber Seals:	HTV Silicone Rubber
Collector Body:	Anodized AL (black)
Insulation:	20mm PF Resin sides 20mm rock wool bottom
Back Sheet:	0.4mm Galvanized steel sheet

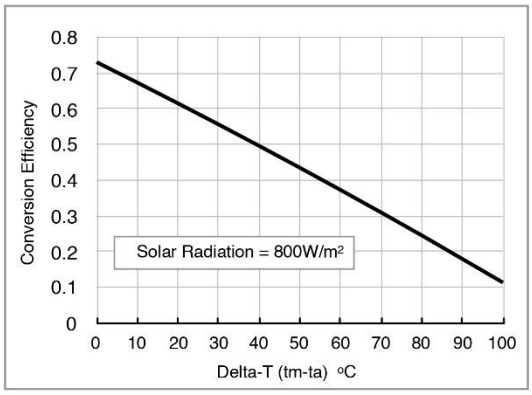
Performance Data

Peak Power Output:	1170 W
Eta0:	0.73
a_1 (W/m²K):	4.5
a_2 (W/m²K²):	0.004
Nominal Flow Rate:	2 L/min
Max Flow Rate:	15 L/min

Physical Specifications

Dimensions (LxWxH):	2000 x 1000 x 70 mm
Aperture Area:	1.824 m²
Gross Area:	2.0 m²
Gross Dry Weight:	30 kg
Fluid Capacity:	1.5L
Max Pressure:	900 kPa

Collector Performance (aperture area)



Sustainable HOT WATER Solutions, Delivered by APRICUS

Apricus Solar Co., Ltd

service@apricus.com www.apricus.com

© 2018 - Apricus Solar Co., Ltd

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10

Anexo 3

Componentes para a montagem do circuito no TRNSYS		
Imagem	**Types**	**Função**
Clima	TYPE 15-3	Leitor de dados e processador de radiação
Impresora	TYPE 65	Impressora gráfica online com arquivo de saída
Bomba	TYPE 3	Bomba de circulação de água
Controlador	TYPE 2	Controlador diferencial de ligar e desligar
Tanque	TYPE 4	Tanque de armazenamento do ACS
Coletor FPC	TYPE 1	Coletor de placa plana
	TYPE 1358	Coletor calha parabolica.
Conversor de unidades	TYPE 57	Conversor de unidades
Diverter	TYPE 11	Conetor em T
Daily load	TYPE 24	Calculadora
Type14h	TYPE 14	Perfir de carga

Versão Final Homologada
02/12/2025 12:10