

# ANÁLISE DE DESEMPENHO DE PROTÓTIPOS DE COLETORES HÍBRIDO TÉRMICO-FOTOVOLTAICO (PVT)

Arthur Araújo Maximo – arthurmaximo094@gmail.com

Elisa Ishitani Melo

Yuji Matsui Noé

Daniel Sena Braga

Vinicius Augusto Camata Santana

Antonia Sonia Alves Cardoso Diniz

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica

## 218 ANÁLISE DE DESEMPENHO DE PROTÓTIPOS DE COLETORES HÍBRIDO TÉRMICO-FOTOVOLTAICO (PVT)

**Resumo.** O suprimento da demanda de eletricidade utilizando as fontes renováveis de energias tem crescido muito, devido aos impactos ambientais causados pelas fontes fósseis. Coletores híbridos fotovoltaico térmico (PVT) têm sido estudados e desenvolvidos nas últimas décadas para a cogeração de energia. Ele utiliza o coletor solar para gerar energia térmica, e módulos fotovoltaicos para gerar energia elétrica, simultaneamente. A energia térmica é obtida pelo resfriamento do módulo fotovoltaico, por meio da troca de calor oriunda da radiação solar com o ar e água circulante, usados para arrefecimento. Enquanto a energia elétrica é obtida através do efeito fotovoltaico das células solares, que converte a irradiância solar em energia elétrica. O objetivo deste trabalho é o estudo comparativo do desempenho elétrico e térmico de coletores híbridos PVT, de diferentes tecnologias fotovoltaicas. Neste trabalho foram desenvolvidos dois protótipos de PVT com coletor solar plano, um com módulo fotovoltaico de Silício policristalino e outro de Telureto de Cádmio. Inicialmente, foram realizados ensaios de pressão interna nos coletores PVT's, a fim de detectar variações de pressão e vazamentos indesejados no interior da tubulação. Em seguida foram medidos os parâmetros elétricos, através do traçador de curvas I-V, para avaliar a eficiência elétrica. Por fim, foi realizado o teste de eficiência térmica nos PTV's, utilizando o simulador solar contínuo. Todos os ensaios foram realizados no laboratório GREEN/PUC Minas. Os resultados de eficiência térmica e elétrica dos coletores PVT's desenvolvidos foram comparados com dispositivos comerciais. Os valores da eficiência térmica para ambos os coletores PVT's foram muito baixos, quando comparados com a eficiência de coletores comercializados no Brasil, provenientes do exterior, necessitando de mais aprimoramento nos dispositivos desenvolvidos para melhorar o desempenho dos protótipos em relação a outros sistemas similares.

**Palavras-chave:** Coletor solar térmico, Módulo fotovoltaico, Coletor híbrido térmico-fotovoltaico (PVT)

## 1. INTRODUÇÃO

Devido às mudanças climáticas globais, diversas medidas estão sendo tomadas para promover a produção de energias renováveis e com o mínimo impacto ambiental. Dentre as fontes de energia destaca-se a como a energia solar, que tem sido muito utilizada em aquecimento e produção de eletricidade, apresentando um potencial grande para aplicações futuras. O sistema solar fotovoltaico térmico híbrido (PVT, do inglês “*Photovoltaic Thermal*”) é projetado para gerar energia térmica e elétrica, simultaneamente.

Coletores de energia solar térmica são dispositivos que absorvem a radiação solar incidente, convertendo-a em energia térmica, e a transferindo por meio de um fluido (geralmente água ou óleo) para diversas aplicações. Por isso, são considerados trocadores de calor. Geralmente, são utilizados como secador/aquecedor de ar para secar produtos agrícolas e/ou aplicações de aquecimento/refrigeração em combinação com aquecedores auxiliares para ar-condicionado de edifícios (Tyagi, 2012), e nas usinas heliotérmicas para geração de eletricidade.

Os módulos fotovoltaicos (PV) são compostos por células solares, que são dispositivos de conversão de energia, usados para converter a irradiância solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Em 1954, pesquisadores do Bell Telephone Laboratories demonstraram a primeira conversão prática da radiação solar em energia elétrica por meio de uma célula solar do tipo junção p-n com eficiência de 6% (Zondag *et al.*, 2006). Com o advento do programa espacial, células fotovoltaicas feitas de silício de grau semicondutor rapidamente se tornaram a fonte de energia escolhida para uso em satélites. Segundo o relatório de Barbose *et al.* (2023), as eficiências da maioria dos módulos fotovoltaicos instalados em 2022 estão entre 20% e 21,5%, sendo que alguns modelos ultrapassam 22%.

No mundo, a capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos atingiu 1 TW, em 2022. A Associação Europeia das Indústrias Fotovoltaicas (EPIA), em seu panorama do mercado global de energia solar em 2022, calculou a geração de energia solar como equivalente a 3,7% da energia global total, sendo que em 2015 este valor era de apenas 1,1%. A potência instalada de energia solar fotovoltaica atingiu 167,8 GW em 2021, com contribuição maior na China e Estados Unidos (EPIA, 2022).

No Brasil, a utilização das tecnologias de aproveitamento da energia solar, como os coletores solares térmicos, módulos fotovoltaicos e os coletores híbridos PVT's, são favorecidas devido aos elevados índices de irradiação solar, em todo o país.

De acordo com o Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA (ANEEL, 2023), o Brasil já possui 35 GW de capacidade instalada, atualmente o mercado nacional conta com 24,34 GW na geração distribuída (GD) e 10,68 GW na geração centralizada (GC). Possuindo 21822 empreendimentos de geração de energia em operação, dividido entre usinas centralizadas e sistemas fotovoltaicos na categoria de geração distribuída. Entretanto, dos 16521 empreendimentos de energia solar em operação, as usinas fotovoltaicas centralizadas equivalem a apenas 4,27% (8237 MW) da potência registrada.

No entanto, a inovação tecnológica incorporando ambas as tecnologias de conversão de energia, chamada de conversão foto-térmica para a cogeração de energia, consiste na conversão da radiação solar em eletricidade e calor, em um único dispositivo, chamado coletor híbrido fotovoltaico-térmico (PVT), em que o coletor térmico retira calor dos módulos fotovoltaicos. Dessa forma, calor e eletricidade são produzidos simultaneamente e parece uma ideia lógica desenvolver um dispositivo que possa atender a ambas as demandas, principalmente na área urbana considerando a exiguidade de espaço físico nas edificações para as duas tecnologias separadamente. Zondag e outros (2006) estimou que o custo do coletor PVT como sendo 10% menor que o custo do coletor térmico e do módulo PV trabalhando separadamente.

Os primeiros estudos referentes à tecnologia PVT datam da década de 70, quando foram realizadas análises de desempenho de PVT para uso residencial (Wolf, 1976). A cada ano, o sistema tem sido mais estudado e aprimorado, mas ainda não é largamente comercializado, devido as barreiras para disseminação da tecnologia PVT no mercado, como o alto custo e a carência de formalização e regulamentação de normas técnicas específicas para essa atividade (Wolf, 1976).

A Fig. 1 apresenta a composição estrutural de um coletor híbrido PVT, em que um coletor solar plano é acoplado a um a módulo fotovoltaico.

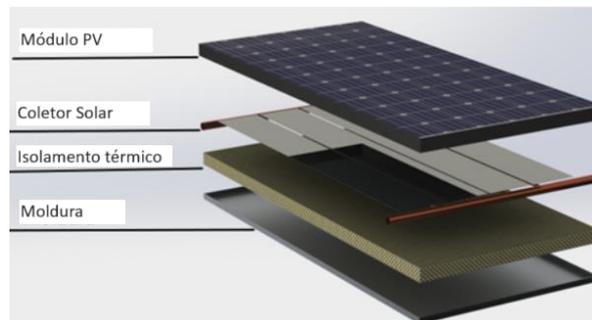


Figura 1 - Vista de um PVT.

A radiação incidente na superfície do módulo fotovoltaico aquece a superfície do módulo, e calor é perdido por convecção e radiação pelas superfícies inferior e superior do mesmo. Há uma perda de calor por convecção para o ambiente e uma perda de calor por radiação para o céu pela superfície superior. Pela superfície inferior, há uma perda de calor por convecção e por radiação para a superfície. Além destas perdas, há o aquecimento das células solares que elevam a temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos (Micheli, 2022).

O módulo fotovoltaico de silício é uma unidade básica formada por um conjunto de células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica a partir do efeito fotovoltaico (Pinho *et al.*, 2014). Em torno de 20% da radiação solar absorvida pelos módulos fotovoltaicos é convertida em eletricidade.

A primeira geração de módulos fotovoltaicos é baseada em células solares monocristalinas, substratos de silício policristalino e outras formas de materiais de silício cristalino. Atualmente existe a segunda geração de módulos, que possuem uma tecnologia de filme fino, com alguns microns de espessura, como telureto de cádmio (CdTe) (Wang *et al.*, 2023). Fthenakis (2018) cita como vantagens do módulo fotovoltaico de telureto de cádmio (CdTe) seu baixo custo de processamento, alto coeficiente de absorção óptica e fácil processamento. É considerada uma tecnologia de filme fina porque as camadas ativas têm apenas alguns microns de espessura.

Módulos fotovoltaicos comerciais de Silício policristalino apresentam eficiência de cerca de 18%, enquanto módulos de Telureto de Cádmio ficam próximos de 15% (Villalva, 2015). Estudos mais recentes apontam que módulos de Si policristalino já chegaram à eficiência de 20,4%, mas já existem módulos de Si monocristalino IBC com eficiências de 24,7%, já os módulos de CdTe estão próximos, com valores máximos registrados de 19,5% (NREL, 2023).

O outro componente do coletor PVT da Fig. 1 é coletor solar, que tem como função promover o aquecimento de um fluido de trabalho, como água, ar ou fluido térmico, através da conversão da irradiação solar em energia térmica. Ele é aplicado em diversos sistemas de aquecimento de água desde aquecimento de uma piscina até aquecimento para processos industriais, em que dependendo da temperatura necessária é preciso de coletores com rastreamento do sol ou calhas parabólicas (Pereira *et al.*, 2006). As eficiências comuns de um coletor comercial giram em torno de 50% a 70% (de Paiva, 2017).

Bergene *et al.* (1995) realizou um estudo com água como fluido de trabalho em um modelo de coletor híbrido PVT para avaliar o desempenho do dispositivo. Apesar de parâmetros como quantidade de água no tanque de armazenamento

influenciarem a temperatura final da água, eles encontraram eficiências térmicas variando de 60-80%. Foi encontrado também que posição da configuração dos tubos e os tipos de células solares utilizadas podem causar diferenças nas eficiências térmicas (CHOW, 2003).

A eficiência térmica do sistema térmico do coletor PVT ( $\eta$ ), é definida como a razão entre energia útil ganha ( $Q_u$ ) e o produto da área do coletor ( $A_c$ ) e a irradiância solar total, ( $G_T$ ) em um período específico (DUFFIE, 2010), definida pela Eq. (1).

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \cdot G_T} = \frac{F_R \cdot [S - U_L \cdot (T_{f,i} - T_a)]}{G_T} \quad (1)$$

Em que:

$\eta$  – Eficiência térmica;

$Q_u$  – Calor útil do sistema (W);

$F_R$  – Fator de remoção de calor (W);

$U_L$  – Coeficiente global de transferência de calor (W/m<sup>2</sup>.K);

$T_{f,i}$  – Temperatura de entrada do fluido (K);

$A_c$  – Área do coletor (m<sup>2</sup>);

$G_T$  – Irradiância solar total (W/m<sup>2</sup>);

$S$  – Quantidade máxima de energia disponível para conversão nos coletores (m<sup>2</sup>);

$T_a$  – Temperatura ambiente (K).

A eficiência elétrica do coletor híbrido PVT ( $\eta_E$ ) é definida como a razão e definido como a razão entre a potência máxima ( $P_{max}$ ) e o produto da área útil do módulo fotovoltaico ( $A_m$ ) pela irradiância solar incidente ( $L_c$ ), (ZILLES, 2012) dada pela Eq. (2):

$$\eta_E = \frac{P_{max}}{A_m \cdot G_T} = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{A_m \cdot G_T} \quad (2)$$

Em que:

$P_{max}$  - Potência máxima (W);

$I_{mp}$  – Corrente máxima;

$V_{mp}$  – Tensão máxima;

$A_m$  – Área útil do módulo fotovoltaico;

$G_T$  - Irradiância solar incidente (W/m<sup>2</sup>);

$A_m$  – Área útil do módulo fotovoltaico.

Neste estudo será realizada uma análise abrangente do desempenho elétrico e térmico de dois protótipos PVT, utilizando tecnologias de módulos fotovoltaicos de silício cristalino (Si-c) e telureto de cádmio (CdTe). A revisão da literatura, bem como o aprimoramento e construção dos protótipos PVT's para avaliação de suas eficiências térmicas e elétricas contribuirá para uma compreensão mais ampla do desempenho diversas configurações destes dispositivos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliação do desempenho de coletores híbridos PVT's, inicialmente foi aprimorado um coletor PVT existente no GREEN PUC Minas, constituído por um coletor solar plano para aquecimento de água e um módulo fotovoltaico de silício cristalino. Para verificar a influência das tecnologias de módulos fotovoltaicos na eficiência térmica do PVT foi desenvolvido um segundo coletor híbrido cuja módulo fotovoltaico é de telureto de cádmio (CdTe).

Os ensaios foram realizados no GREEN Solar PUC Minas (Grupo de Estudos de Energia), situado no Campus Coração Eucarístico da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Eles foram baseados nas recomendações da norma Brasileira ABNT NBR 15747-2.

### 2.1 Protótipos Utilizados

**Protótipo PVT 1.** O primeiro protótipo do coletor híbrido térmico fotovoltaico (PVT 1) possui na parte superior um módulo fotovoltaico de silício policristalino da marca Solarex, modelo MSX-53, como apresentado na Fig. 2. O protótipo possui moldura de alumínio anodizado para evitar torção do mesmo.

Este módulo fotovoltaico é interligado a um coletor solar do tipo tubo-aleta de cobre, que contém quatro tubos de cobre para a circulação da água a ser aquecida, ligados a quatro placas absorvedoras de alumínio. Estas placas são responsáveis pela transferência por condução do calor do módulo fotovoltaico para os tubos, conforme mostrado na Fig. 3.

O verniz Maxi Rubber foi utilizado para fixar a serpentina. Para finalizar o protótipo foi inserido um material isolante, lã de rocha, composto de fibras minerais de rochas vulcânicas.

Posteriormente, para um segundo teste de eficiência térmica, foi aplicada pasta térmica da marca Implastec entre o coletor e o módulo fotovoltaico. Na parte inferior do PVT há uma camada de lã de rocha, que faz a função de isolante térmico. Na Tab. 1 estão descritas as características do módulo fotovoltaico de Silício policristalino e do coletor solar plano utilizado para a confecção do mesmo.

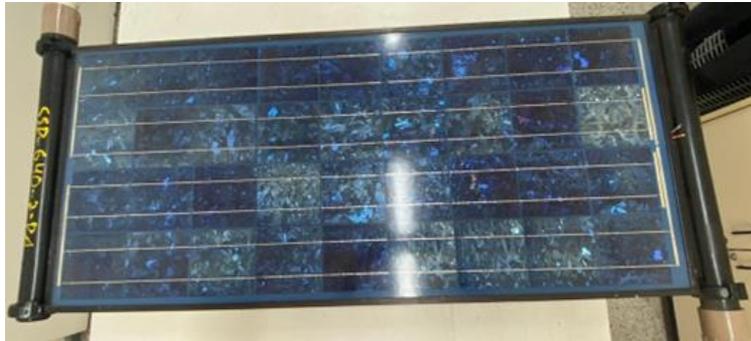


Figura 2 - Módulo fotovoltaico do protótipo 1.

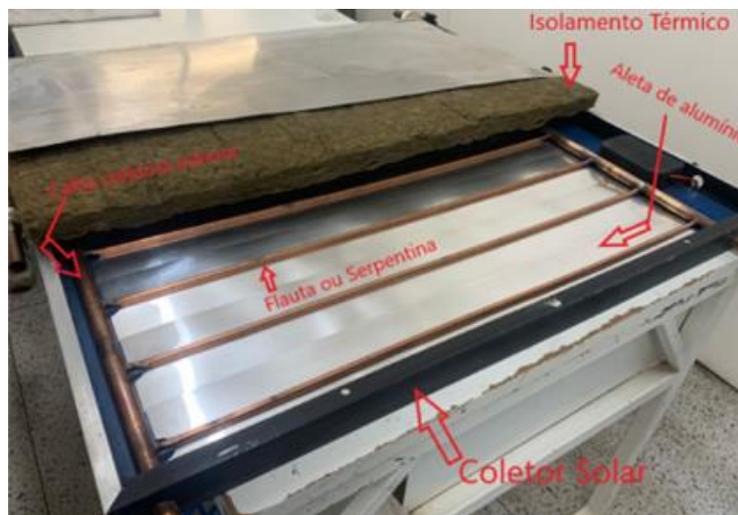


Figura 3 - Protótipo de PVT 1 desmontado.

**Protótipo PVT 2.** O segundo protótipo do coletor híbrido térmico fotovoltaico (PVT 2) também foi construído com um coletor solar do tipo tubo-aleta de cobre, mas dessa vez utilizando cinco serpentinas. Em sua parte superior, é acoplado um módulo fotovoltaico de Telureto de cádmio (CdTe), da marca First Solar - modelo FS-4110-2, apresentado na Fig. 4.

O mesmo processo construtivo do coletor PVT 1 foi realizado para o coletor PVT 2. Entre o coletor e o módulo fotovoltaico foi aplicada pasta térmica da marca Implastec. Na parte inferior do PVT há uma camada de lã de rocha, que faz a função de isolante térmico. A Tab. 1 mostra as especificações técnicas dos componentes do PVT 2.



Figura 4 - Módulo fotovoltaico de Telureto de Cádmio do protótipo PVT 2.

Tabela 1 - Especificações dos protótipos de PVT.

Protótipo	PVT 1	PVT 2
<b>Módulo Fotovoltaico</b>	Solarex modelo MSX-53	First Solar modelo FS-4110-2
Tipo de Células	Silício policristalino	Telureto de cádmio (CdTe)
Potência máxima (Wp)	53	110
Tensão circuito aberto - Voc (V)	20,6	87,2
Corrente Curto-circuito - Isc (A)	3,4	1,75
Corrente de potência máxima - Imp (A)	3,2	1,59
Número de Células	36	-
Dimensões dos módulos (mm)	1109 x 506 x 56	1200 x 600 x 10
<b>Coletor Solar</b>	Tube-Aleta	Tube-Aleta
Material dos tubos	Cobre	Cobre
Diâmetro dos tubos (mm)	9,5	9,4
Diâmetro dos <i>manifolds</i> (mm)	20,8	22,8
Número de tubos	4 serpentinas e 2 calhas	5 serpentinas e 2 calhas
Comprimento total dos tubos (mm)	920	945
Comprimento total dos <i>manifolds</i> (mm)	600	705
Dimensões das chapas coletoras	920 x 120 x 0,33	895 x 125 x 0,40
Número de chapas coletoras	4	5
Espessura da chapa de alumínio (mm)	0,3	0,3
Material do isolamento	Lã de rocha	Lã de rocha
Espessura do isolamento (mm)	40	20

## 2.2 Procedimento Experimental

Os protótipos serão avaliados para verificar a integridade de sua construção através do ensaio de pressão interna, o desempenho elétrico através dos parâmetros obtidos nas medições das curvas I-V e o desempenho térmico a partir das medições de eficiência térmica obtidos no Simulador Solar.

Os ensaios serão baseados nas recomendações da Norma Brasileira ABNT NBR 15747-2 de 2009, no qual será realizado no segundo semestre de 2023, no laboratório do GREEN PUC MINAS (Grupo de Estudo em Energia), situado na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais de Belo Horizonte – PUC-Minas, no campus COREU, no bairro Coração Eucarístico. Nos itens abaixo, estes testes e ensaios estão descritos.

**Ensaio de pressão interna.** Esse teste tem como objetivo detectar qualquer variação de pressão e vazamentos indesejados no interior da tubulação do coletor PVT. Para realizar esse teste, utiliza-se uma bomba manual, uma válvula de controle de vazão, um medidor de pressão digital e um purgador, conforme mostrado na Fig. 5.



Figura 5 - Bancada de teste de pressão interna.

A finalidade é eliminar todo o ar presente no circuito, bombeando água proveniente de um reservatório para a entrada do sistema. Um purgador é posicionado na saída de água para eliminar o ar no interior das tubulações e do sistema, enquanto os demais caminhos são devidamente selados. Primeiramente, bombeia-se água para o sistema até alcançar a pressão nominal de trabalho especificado pelo fabricante do coletor e utiliza-se o purgador para verificar que apenas água está presente no sistema.

Em seguida, eleva-se a pressão para a pressão de ensaio, que é dada pela pressão nominal de trabalho do coletor, somada a 50% dessa pressão até atingir a pressão de ensaio. Após isso, o ensaio é iniciado, em que o coletor fica com essa pressão constante durante 15 minutos para verificar que não há qualquer variação de pressão, indicando a ausência de vazamentos.

**Ensaio dos parâmetros elétricos.** Os parâmetros elétricos dos protótipos serão obtidos utilizando-se o traçador de curva I-V. Este equipamento é capaz de realizar medições de tensão, corrente e potência em módulos fotovoltaicos. A curva I-V é a curva que relaciona a tensão (V) e a corrente (I) na saída de um módulo. A análise desta curva permite avaliar os parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos, ou se há algum problema de desempenho elétrico, quando comparado aos dados originais do módulo fornecidos pelo fabricante.

Após cada coleta de dados, o equipamento gera um gráfico que relaciona a corrente (I) com a tensão de saída (V) dos módulos fotovoltaicos, bem como a potência (P) em função da tensão (V). O equipamento também informa ao usuário os valores de corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e potência máxima do módulo analisado. O traçador de curva I-V a ser utilizado no trabalho é o modelo I-V500wn da marca HT, e a célula de referência modelo Seaward Solar Survey 200R.

O teste para traçar a curva I-V é realizado outdoor, ao ar livre, nas dependências externas do laboratório. Deve ser dada preferência para dias ensolarados, com poucas nuvens e com irradiância solar acima de 800 W/m<sup>2</sup>.

Para comparação dos dados obtidos com a situação original do módulo fotovoltaico, os parâmetros elétricos são normalizados as condições padrão de teste, isto é, 1000 W/m<sup>2</sup> e 25°C.

A partir dos dados obtidos, calcula-se a eficiência elétrica ( $\eta$ ), conforme Eq. (1), em que  $P_{\text{máx}}$  é a potência máxima (W),  $I_{\text{mp}}$  é a corrente de máxima potência (A),  $V_{\text{mp}}$  é a tensão de máxima potência (V),  $A_c$  é a área de abertura dos PVT's (m<sup>2</sup>),  $L_c$  é a irradiância solar incidente (W/m<sup>2</sup>) e  $A$  é a área útil do módulo (m<sup>2</sup>). O cálculo da eficiência elétrica é feito utilizando-se a Eq. (1).

**Ensaio de eficiência térmica.** Para obtenção da eficiência térmica, o simulador solar é utilizado, que realiza ensaios térmicos em diferentes faixas de temperaturas para avaliar a eficiência dos coletores testados. Os dados coletados são tratados por um software desenvolvido pelo próprio GREEN e os testes e cálculos de eficiência são guiados pelas diretrizes da Norma NBR ABNT 15747-2:2009.

O simulador solar possibilita a realização de testes de desempenho em diversos equipamentos, como coletores solares, coberturas transparentes e materiais poliméricos. Esses testes são mais rápidos, confiáveis e não dependem das condições climáticas.

O equipamento da marca PSE, modelo SORAS-ST8 - Steady State Solar Simulator, conforme mostrado na Fig. 6 está localizado no Grupo de Estudos em Energia (GREEN) da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e possui uma potência total de 40 kW. Ele emite um espectro de radiação similar ao do Sol e é composto por um sistema de oito lâmpadas especiais do tipo Metal Halide Global (MHG), as quais iluminam uma área de 2,80 m<sup>2</sup>.



Figura 6 - Simulador solar do GREEN/PUCMINAS.

O funcionamento do sistema utiliza três resistências para simular o aquecimento da água na temperatura desejada em sete degraus específicos. Primeiramente, a água entra a temperatura ambiente, onde são coletados quatro pontos e em seguida é ligada uma das resistências para dar o primeiro “degrau”. Após uma espera de 15 minutos para que a temperatura seja estabilizada e entre em regime permanentes, são coletados novamente quatro pontos de operação por um minuto, medindo as grandezas de temperatura de saída e entrada do coletor, vazão, velocidade do vento e radiação.

Esse processo é realizado mais duas vezes, utilizando as outras resistências, aumentando a potência para que a temperatura aumente mais até chegar num ponto máximo, chamada temperatura de estagnação, a aproximadamente 70°C. A partir desse momento é feito o processo inverso, retirando as resistências para diminuir a temperatura e coletar novamente os três pontos restantes dos degraus de descida, até que seja alcançada novamente a temperatura ambiente.

No final do ensaio teremos 28 pontos coletados com os dados de cada ponto em que se utiliza o software National

Instruments LabVIEW para fazer a aquisição, armazenamento e visualização desses dados. Após isso, esses dados são exportados para um modelo para tratar e utilizar esses dados no software Excel, onde é feito o cálculo das eficiências instantâneas para cada ponto, de acordo com a norma NBR ABNT 15747-2:2009.

O cálculo da eficiência térmica ( $\eta$ ) é feito a partir da Eq. (1), em que  $Q_u$  é o calor útil do sistema (W),  $FR$  é o fator de remoção de calor (W),  $UL$  é o coeficiente global de transferência de calor ( $W/m^2K$ ),  $T_{fi}$  é a temperatura de entrada do fluido (K),  $A_c$  é a área do coletor ( $m^2$ ),  $GT$  é a irradiância solar total ( $W/m^2$ ),  $S$  é a quantidade máxima de energia disponível para conversão nos coletores ( $m^2$ ) e  $T_a$  é a temperatura ambiente (K).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Coletor híbrido PVT 1 com módulo fotovoltaico de Silício policristalino

Inicialmente, o protótipo PVT 1 que utiliza módulo fotovoltaico de silício foi submetido ao ensaio de pressão interna. O mesmo foi aprovado no teste de pressão interna, não apresentando nenhum vazamento. Ele foi submetido a 5 bar durante 15 minutos. O coletor solar com serpentinas de cobre realizou o ensaio com a pressão de trabalho deste modelo de e não foram observados nenhum tipo de vazamento no protótipo.

O ensaio da curva I-V do PVT 1 foi realizado em ambiente externo, às 12:00, com uma irradiância solar de aproximadamente  $995 W/m^2$ , o que está de acordo com a norma do teste, que requer uma irradiância acima de  $800 W/m^2$ . O traçador de curva I-V registrou dados durante 8 minutos, gerando 47 curvas I-V. Após normalizar os dados a STC, obtém-se uma corrente de pico igual a 3,12 A e tensão de pico igual a 15,64 V, gerando uma potência máxima de 48,7 W. A Fig. 7 apresenta a curva I-V do protótipo 1 e a eficiência elétrica calculada é igual a 8,68%, obtida a partir da Eq. (2).

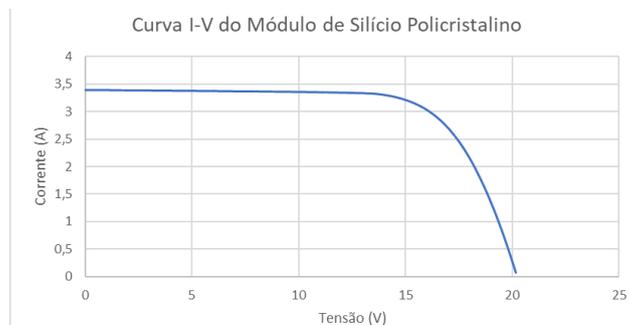


Figura - 7 Curva I-V do protótipo PVT 1.

O Ensaio de eficiência térmica foi realizado no simulador solar, por 114 minutos, durante os quais foram registrados 28 linhas de dados, 4 para cada um dos 7 pontos de operação. Com uma vazão média de  $0,6435 L/min$ , o protótipo conseguiu aquecer a água até a temperatura de aproximadamente  $50,13^{\circ}C$ . Acima deste valor, a água saía do coletor com a mesma temperatura em que havia entrado.

Com base nos dados obtidos, a eficiência térmica obtida do PVT foi de  $3,7\%$ , o que resultaria em uma Produção Média Mensal de Energia elétrica (PMEe) igual a  $5,24 kWh/mês.m^2$ .

Devido à baixa eficiência térmica, o protótipo PVT 1 foi desmontado para aplicação de pasta térmica, visando melhorar a transferência de calor entre o módulo fotovoltaico e o coletor solar e, conseqüentemente, aumentar a eficiência do mesmo. A pasta térmica, da marca Implastec, foi aplicada por toda a superfície do coletor, como apresentado na Fig. 8.



Figura 8 - Aplicação da pasta térmica no protótipo 1.

Em seguida, com o protótipo aprimorado, repetiu-se o ensaio no Simulador Solar. O segundo teste teve uma duração de 77 minutos, durante os quais foram registrados 16 linhas de dados, 4 para cada um dos 4 pontos de operação de aquecimento. Para os 3 pontos restantes, dos “degraus” de decida, foram utilizados os mesmos 3 pontos do início do ensaio, a fim de agilizar o processo. Ainda com uma vazão média de  $0,6435 L/min$ , o protótipo com pasta térmica conseguiu aquecer a água até uma temperatura próxima de  $49^{\circ}C$ . Com base nos dados coletados, a eficiência térmica obtida do PVT foi de  $10,57\%$ , o que resultaria em uma Produção Média Mensal de Energia elétrica (PMEe) igual a

14,99 kWh/mês.m<sup>2</sup>.

### 3.2 Coletor híbrido PVT 2 com módulo fotovoltaico de CdTe

O protótipo PVT 2, que utiliza módulo fotovoltaico de telureto de cádmio, também foi aprovado no teste de pressão interna sem problemas. Durante o ensaio, o coletor solar com serpentinas de cobre realizou o ensaio com a pressão de trabalho deste modelo de 5 bar durante 15 minutos e não foram observados nenhum tipo de vazamento no protótipo PVT 2.

A medição dos parâmetros elétricos através da obtenção da curva I-V do PVT 2 foi realizada às 14:30, em ambiente externo, com uma irradiância solar de aproximadamente 922 W/m<sup>2</sup>, o que está de acordo com a norma do teste, que requer uma irradiância acima de 800 W/m<sup>2</sup>.

O equipamento registrou dados durante cerca de 2 minutos, gerando 5 curvas I-V. Após normalizar os dados a STC, obtém-se uma corrente de pico igual a 1,58 A e tensão de pico igual a 58,93 V, gerando uma potência máxima de 93,36 W. A Fig. 9 apresenta a curva I-V do protótipo PVT 2 e a eficiência elétrica calculada é igual a 12,97%, obtida a partir da Eq. (2).

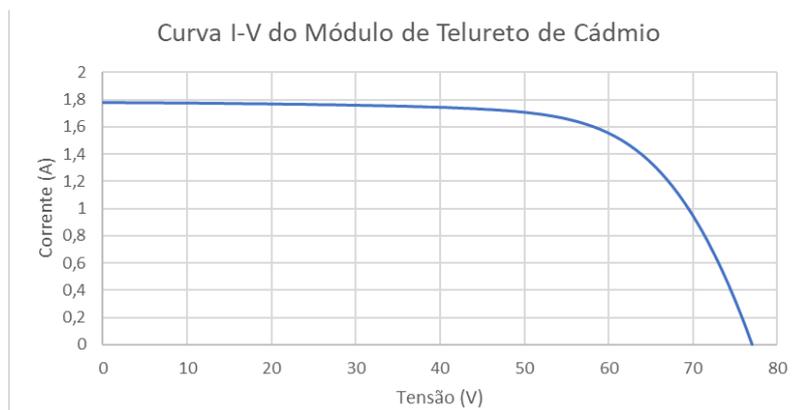


Figura 9 - Curva I-V do protótipo 2.

O ensaio de eficiência térmica realizado no simulador solar teve duração de 137 minutos, durante os quais foram registrados 16 linhas de dados, 4 para cada um dos 4 pontos de operação de aumento de temperatura de entrada no coletor solar. Para os 3 pontos dos “degraus” de decida, foram utilizados os mesmos 3 pontos do início do ensaio. Com uma vazão média de 0,8425 L/min, o protótipo conseguiu aquecer a água até a temperatura de aproximadamente 53,8°C. Com base nos dados obtidos, a eficiência térmica obtida do PVT 2 foi de 11,79%, o que resultaria em uma Produção Média Mensal de Energia elétrica (PMEe) igual a 16,35 kWh/mês.m<sup>2</sup>.

A análise do desempenho entre os dois diferentes protótipos PVTs revelou que o sistema que utilizava o PVT 2 com módulo fotovoltaico de CdTe apresentou uma eficiência elétrica mais elevada. O módulo fotovoltaico de Silício já está degradado, apresentando 20% da sua potência de saída original, enquanto o módulo fotovoltaico de CdTe é novo, não tendo sido utilizado em campo.

Além disso, a adição de pasta térmica no PVT 1 mostrou uma melhoria significativa no desempenho térmico do protótipo, com um aumento de mais de 100% na eficiência térmica inicial, devido a melhora no isolamento, reduzindo as perdas térmicas.

Por outro lado, os resultados das eficiências térmicas nos ensaios realizados se mostraram muito abaixo aos valores que são alcançados em coletores solares convencionais. Em algumas referências estão em torno de 60-80%, enquanto o máximo alcançado em nossos testes foi de aproximadamente 12%. Este resultado pode ser justificado pelas dificuldades encontradas durante a construção artesanal dos sistemas.

Os protótipos foram projetados de uma forma muito "artesanal" para o desenvolvimento do trabalho, pois foram construídos a partir de coletores solares, módulos fotovoltaicos e outras estruturas já existentes de outros sistemas, que tiveram que ser adaptados aos projetos de PVT. Por esse motivo, há uma distância considerável entre o coletor solar e o módulo fotovoltaico, o que leva a uma grande perda de transferência de calor, devido à falta de uma área extensa de contato direto entre os componentes. Além disso, a parte posterior dos módulos é feita com um material polimérico isolante, o que interfere ainda mais a transferência de calor.

Considerando os objetivos do trabalho, conclui-se que, em termos de eficiência elétrica, o PVT 2, que utiliza um módulo de CdTe, apresenta melhor desempenho em todas as condições analisadas, pois tem uma produção de energia elétrica maior. Enquanto, para a eficiência térmica, os dois protótipos PVTs tiveram resultados próximos, considerados muito baixos, comparados a coletores solares convencionais.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feita uma comparação entre dois protótipos de sistemas híbridos PVTs, utilizando diferentes tipos de tecnologia na sua construção: um com um módulo fotovoltaico de células policristalinas de silício e outro com um módulo fotovoltaico mais moderno, de Telureto de Cádmio (CdTe).

Considerando todos os parâmetros avaliados nos protótipos PVT's destaca-se que a eficiência térmica depende do processo construtivo. Os protótipos foram projetados de uma forma muito "artesanal" construídos com dispositivos existentes e disponíveis no GREEN/PUC MINAS que tiveram que ser adaptados aos projetos de PVT. Por esse motivo, há uma distância considerável entre o coletor solar e o módulo fotovoltaico, o que leva a uma grande perda de transferência de calor, devido à falta de uma área extensa de contato direto entre os componentes.

A análise do desempenho entre os dois diferentes protótipos PVTs revelou que o sistema que utilizava o PVT 2 com módulo fotovoltaico de CdTe apresentou uma eficiência elétrica mais elevada, porém os dois protótipos apresentaram eficiência térmica próximas, demonstrando que os dois possuem os mesmos fatores de perdas térmicas.

No entanto, estes desafios podem ser superados com novas pesquisas e o desenvolvimento destes sistemas, utilizando os mesmos métodos de fabricação utilizados na indústria que desenvolve sistemas de energia solar.

#### *Agradecimentos*

Os autores agradecem a equipe do laboratório Grupo de Estudos em Energia (GREEN) da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

#### REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2023. Sistema de Informações de Geração ANEEL – SIGA. Brasília, Brasil.
- Barbose, G. L. *et al.*, 2023. Pricing and Design Trends for Distributed Photovoltaic Systems in the United States 2023 Edition.
- Bergene, T., Løvvik, O. M., 1995. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells, *Solar Energy*, vol. 55, n. 6, pp. 453-462.
- de Paiva, E. S. A. *et al.*, 2017. Análise Comparativa da Eficiência Térmica de Coletores A, B e C com Penetração de Água, *Revista Brasileira de Energia Solar*, vol. 8, n. 2, pp. 81-87.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*, Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition.
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA), 2022. Global market outlook for solar power: 2022-2026. Bruxelas.
- Fthenakis, V. M., Lynn, P. A., 2018. *Electricity from sunlight: photovoltaic-systems integration and sustainability*, John Wiley & Sons.
- Micheli, L., 2022. The temperature of floating photovoltaics: Case studies, models and recent findings, *Solar Energy* 242, 234–245.
- NREL, 2023. Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html>>. Acesso em 27 de nov. de 2023.
- Pereira, E. M. D. *et al.*, 2006. Curso de capacitação em aquecimento solar: Projeto SolBrasil: Manual do Professor. Belo Horizonte: GREEN/PUC Minas.
- Pinho, J. T. *et al.*, 2014. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, Rio de Janeiro, vol. 1, pp. 47-499.
- Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., Tyagi, S. K., 2012. Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n. 3, pp. 1383-1398.
- Villalva, M. G., 2015. *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. 2. ed. São Paulo: Érica.
- Wang, Y. *et al.*, 2023. Research progress in doped absorber layer of CdTe solar cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 113427.
- Wolf, M., 1976. Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences, *Energy Conversion*, v. 16, n. 1-2, p. 79-90.
- Zondag, H. A. *et al.*, 2006. PVT roadmap. A European guide for the development and market introduction of PVT Technology.

#### PERFORMANCE ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC-THERMAL HYBRID SOLAR COLLECTOR PROTOTYPES

**Abstract.** *The supply of electricity demand using renewable energy sources has grown a lot, due to the environmental impacts caused by fossil sources. Hybrid thermal photovoltaic (PVT) collectors have been studied and developed in recent decades for energy cogeneration. It uses the solar collector to generate thermal energy, and photovoltaic modules to generate electrical energy, simultaneously. Thermal energy is obtained by cooling the photovoltaic module, through the*

*exchange of heat from solar radiation with circulating air and water, used for cooling. While electrical energy is obtained through the optical absorption of solar cells, which converts solar irradiance into electrical energy. The objective of this work is the comparative study of the electrical and thermal performance of PVT hybrid collectors, using different photovoltaic technologies. In this work, two PVT prototypes were developed with a flat solar collector, one with a photovoltaic module made of polycrystalline silicon and the other made of cadmium telluride. Initially, internal pressure tests were carried out on the PVT's collectors, to detect pressure variations and unwanted leaks inside the piping. The electrical parameters were then measured, using the I-V curve tracer, to evaluate the electrical efficiency. Finally, the thermal efficiency test was carried out on the PTVs, using the continuous solar simulator. All tests were carried out in the GREEN/PUC Minas laboratory. The thermal and electrical efficiency results of the developed PVT collectors were compared with commercial devices. The thermal efficiency values for both PVT collectors were very low, when compared to the efficiency of collectors sold in Brazil, from abroad, requiring further improvement in the devices developed to improve the performance of the prototypes in relation to other similar systems.*

**Keywords:** *Thermal solar collector, Photovoltaic solar collector, PVT collector*