

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ENTRE COLETOR HÍBRIDO TÉRMICO
FOTOVOLTAICO E MÓDULO FOTOVOLTAICO**

por

Daniel Contarin Luzzi

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, julho de 2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ENTRE COLETOR HÍBRIDO TÉRMICO
FOTOVOLTAICO E MÓDULO FOTOVOLTAICO**

por

Daniel Contarin Luzzi

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Profa. Dra. Leticia Jenisch Rodrigues

Banca examinadora:

Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues – DEMEC/UFRGS
MSc. Eng. Crissiane Alves Ancines – PROMEC/UFRGS
Prof. Dr Arno Krenzinger – DEMEC/UFRGS

Porto Alegre, 21 de julho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me apoiaram e me incentivaram neste trabalho: colegas de curso, pais e amigos. Um agradecimento especial à minha orientadora Letícia e todo o pessoal do LABSOL que me ajudaram muito, sempre com bom humor.

LUZZI, D. C. Comparação de desempenho entre coletor híbrido térmico fotovoltaico e módulo fotovoltaico. 2017. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre a adaptação de um módulo fotovoltaico resultando em um coletor híbrido térmico fotovoltaico. Inicialmente, é feita a adaptação do módulo (inserção e colagem de serpentina plástica, e isolamento com isopor) e, após ser instrumentado e conectado na bancada, são realizados testes, juntamente com um outro módulo fotovoltaico igual ao utilizado no coletor. Com os resultados obtidos nos testes é realizada uma comparação entre a energia elétrica produzida em ambos os módulos a fim de avaliar a performance do coletor híbrido. Para as situações avaliadas, o módulo adaptado mostrou desempenho elétrico superior ao módulo convencional.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar, Coletor Híbrido Térmico Fotovoltaico, Módulo Fotovoltaico, Eficiência Elétrica, Desempenho Térmico.

LUZZI, D. C. Performance comparison between photovoltaic thermal hybrid solar collector and photovoltaic module. 2017. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

In this work it is presented a study about the adaptation of a photovoltaic module into a hybrid solar collector. Firstly it was developed an adaptation of the module (by inserting and fixing a plastic serpentine and styrofoam insulating) and, after being instrumented and connected to the test stand, tests are made, with another module like the adapted one. With the obtained results, a comparison was made about the produced electric energy by both, in order to verify its performance. The adapted module presented a better electrical performance than the conventional module.

KEYWORDS: Solar Energy, Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collector, Photovoltaic Module, Electrical Efficiency, Thermal Performance.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	FUNDAMENTOS.....	1
2.1	COLETOR SOLAR HÍBRIDO TÉRMICO FOTOVOLTAICO	1
2.2	MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	3
3	MONTAGEM DO COLETOR ADAPTADO	5
3.1	ESCOLHA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	5
3.2	MONTAGEM	6
4	METODOLOGIA DE TESTES.....	7
4.1	BANCADA DE TESTES.....	7
4.2	CIRCUITO TÉRMICO	8
4.3	CIRCUITO ELÉTRICO.....	8
4.4	SENSORES	9
4.4.1	RADIAÇÃO.....	9
4.4.2	TEMPERATURA.....	9
4.4.3	VAZÃO	10
4.4.4	AQUISIÇÃO DE DADOS	10
4.5	TESTES.....	10
4.6	INCERTEZAS.....	11
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	11
5.1	ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	12
5.2	ANÁLISE TÉRMICA	15
5.3	ANÁLISE DO MÓDULO ADAPTADO SEM CIRCULAÇÃO DE ÁGUA.....	17
5.4	ANÁLISE DAS INCERTEZAS.....	19
6	CONCLUSÃO	21
6.1	PROPOSTAS FUTURAS	21
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
8	ANEXOS.....	24

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de um coletor híbrido térmico fotovoltaico	2
Figura 2 - Disposição esquemática de um sistema solar híbrido de circulação direta forçada.....	2
Figura 3 - Curva I-V de um módulo fotovoltaico.....	3
Figura 4 - Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25° C.	4
Figura 5 - Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (para irradiância de 1000W/m ² , espectro AM 1,5).....	4
Figura 6 – Curva característica dos módulos fotovoltaicos.....	6
Figura 7 - Etapas de montagem de um coletor híbrido: a) Serpentina e isolante térmico; b) Serpentina e isolante térmico fixados ao fundo do módulo; c) Chapa de alumínio fechando o coletor híbrido térmico fotovoltaico.....	6
Figura 8 – Esquema simplificado do coletor adaptado.....	7
Figura 9 – Foto da bancada experimental no LABSOL	7
Figura 10 - Esquema do circuito hidráulico utilizado.	8
Figura 11 – Esquema da conexão elétrica dos módulos.....	9
Figura 12 - Fotos da montagem e fixação do sensor de temperatura dos módulos: a) Fixação de um Pt100 desencapsulado em uma chapa de cobre; b) Cobertura de araldite; c) Sensor fixado no centro de uma célula do módulo.	10
Figura 13 - Temperatura dos módulos durante os dias 2 e 23 de junho.	13
Figura 14 – Potência em função do tempo para os dias 2 e 23 de junho.....	13
Figura 15 - Eficiência elétrica com $GT_{m\u00e9dia} = 815 \text{ W/m}^2$ e $T_{am\u00e9dia} = 24,1^\circ\text{C}$, no dia 23 de junho.....	14
Figura 16 - Eficiência elétrica com $GT_{m\u00e9dia} = 906 \text{ W/m}^2$ e $T_{am\u00e9dia} = 21,8^\circ\text{C}$, no dia 2 de junho.	15
Figura 17 - Temperaturas ao longo do dia 23 de junho.....	16
Figura 18 – Temperaturas ao longo do dia 2 de junho	17
Figura 19 - Temperatura dos módulos no dia 24 de junho.....	18
Figura 20 - Eficiência elétrica com $GT_{m\u00e9dia} = 862 \text{ W/m}^2$ e $T_{am\u00e9dia} = 25,7^\circ\text{C}$, no dia 24 de junho.....	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados obtidos a partir do ensaio dos módulos escolhidos para o experimento.	5
Tabela 2 – Energia elétrica produzida horária.....	12
Tabela 3 - Performance térmica (Pert) do módulo híbrido adaptado.....	16
Tabela 4 - Energia produzida no dia 24 de junho.....	18
Tabela 5 - Valores de incerteza das grandezas.....	19
Tabela 6 - Valores de incerteza das grandezas relacionadas à análise térmica	20

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAVA	Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento
FDE	Fundo de Escala
IAE	International Energy Agency
LABELO	Laboratórios Especializados em Eletroeletrônica, Calibração e Ensaios
LABSOL	Laboratório de energia solar da UFRGS
LETA	Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos
NBR	Norma brasileira
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature
PV/T	Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collector
PV	Photovoltaic Solac Collector
STC	Standard Test Conditions
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área do módulo	[m ²]
A_C	Área de abertura do módulo	[m ²]
$C_{p,água}$	Calor específico	[J/kg.K]
D	Diâmetro interno	[m]
G_T	Irradiância solar no plano inclinado	[W/m ²]
$G_{Tmédia}$	Irradiância média	[W/m ²]
I	Corrente medida	[A]
I_{mp}	Corrente na máxima potência	[A]
I_{sc}	Corrente de curto-circuito	[A]
\dot{m}	Taxa mássica	[kg/s]
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>	[°C]
FF	Fator de Forma	
η_e	Eficiência Elétrica	[%]
P_{MP}	Ponto de máxima potência	[W]
ρ	Densidade do fluido	[kg/m ³]
Per_t	Performance Térmica	[%]
Re	Número de Reynolds	
T_a	Temperatura ambiente	[°C]
$T_{amédia}$	Temperatura ambiente média	[°C]
T_e	Temperatura do fluido na entrada do coletor	[°C]
T_s	Temperatura do fluido na saída do coletor	[°C]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[kg/m.s]
v	Velocidade do escoamento	[m/s]
V_{oc}	Tensão de circuito aberto	[V]
V_{mp}	Tensão de máxima potência	[V]
ω_n	Incerteza das variáveis independentes	
ω_R	Incerteza propagada da grandeza	

1 INTRODUÇÃO

Atualmente há uma grande preocupação com o uso de energia, principalmente devido à escassez de suas fontes. Assim, fontes alternativas estão cada vez mais populares e consequentemente mais estudos estão sendo feitos para auxiliar no seu desenvolvimento para se tornarem mais eficientes e atuantes no mercado. Ainda mais no Brasil que já é o quinto maior do mundo em potência térmica, a partir de sistemas de aquecimento solar segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2014). Entretanto, ao levar em conta termos de capacidade instalada per capita, o Brasil ocupa apenas a 32ª posição entre os 57 países listados. Isso demonstra que, ao mesmo tempo em que há avanços importantes no uso da tecnologia no Brasil, o potencial a ser explorado é muito maior, segundo o levantamento feito pela Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA, 2014).

A energia solar sendo uma fonte abundante e renovável apresenta um grande potencial de exploração para a humanidade e pode ser aplicada em várias tarefas, como o aquecimento de fluidos até a produção direta de energia elétrica a partir de células fotovoltaicas. Devido a essas duas tecnologias estarem sendo cada vez mais utilizadas, se desenvolveu a ideia de um sistema híbrido que, ao mesmo tempo, funciona com as duas funções, ou seja, é um módulo fotovoltaico conectado a um sistema de aquecimento solar. Seu funcionamento é bastante semelhante com as duas tecnologias apresentadas porém, ao operar concomitantemente, há uma maior energia total produzida pela mesma área, considerando sistemas separados, favorecendo locais com pouco espaço, além de diminuir seu custo total (Charalambous et al. 2007).

Ancines, 2016 realizou uma comparação entre um coletor híbrido térmico fotovoltaico comercial com um módulo fotovoltaico convencional, porém utilizou modelos diferentes com potências diferentes. Ao testá-los com as mesmas condições o coletor híbrido apresentou uma maior eficiência elétrica em relação ao fotovoltaico.

Já Rawatt e Kumar, 2015, analisaram o desempenho de um coletor híbrido construído, em função da sua eficiência elétrica e térmica. Várias vazões mássicas de água foram analisadas e verificou-se a variação da eficiência elétrica em função das mesmas. Além disso, um estudo de eficiência global e exergética foi realizado sobre o coletor.

Neste trabalho realizou-se uma comparação entre um modelo comum de módulo fotovoltaico e uma adaptação de coletor híbrido desenvolvido com auxílio do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a partir de testes em condições idênticas.

2 FUNDAMENTOS

Nesta seção é apresentada a fundamentação teórica do coletor solar térmico fotovoltaico e também sobre o funcionamento de módulos fotovoltaicos.

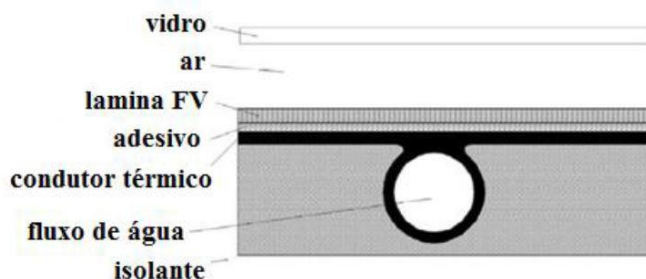
2.1 COLETOR SOLAR HÍBRIDO TÉRMICO FOTOVOLTAICO

O sistema de operação de um coletor solar híbrido térmico fotovoltaico, PV/T (*Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collector*) consiste na conversão simultânea de radiação solar em calor e eletricidade. Resumidamente, o coletor é composto por um módulo fotovoltaico e um coletor térmico acoplado ao mesmo. Deste modo, o coletor térmico absorve a energia térmica do módulo fotovoltaico que seria perdida para o ambiente e, por conseguinte, resfria o mesmo, aumentando a sua eficiência elétrica (Charalambous et al. 2007).

Há diversas formas de construção de coletores térmicos, apresentando formas e conceitos de funcionamento diferenciados que foram analisados e comparados, chegando a conclusão que o coletor do tipo chapa e tubo (*sheet-and-tube PV/T collector*) apresenta a mais promissora alternativa para produção de água quente doméstica. Portanto, esse é o tipo de coletor híbrido mais comum devido ao seu design ser fácil de ser produzido, embora apresente um eficiência levemente inferior (Zondag et al. 2003). O coletor

tipo chapa e tubo é composto por uma camada de vidro, ar, uma lâmina fotovoltaica, um adesivo, um condutor térmico, um tubo para circulação de água e um isolamento. Conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema de um coletor híbrido térmico fotovoltaico



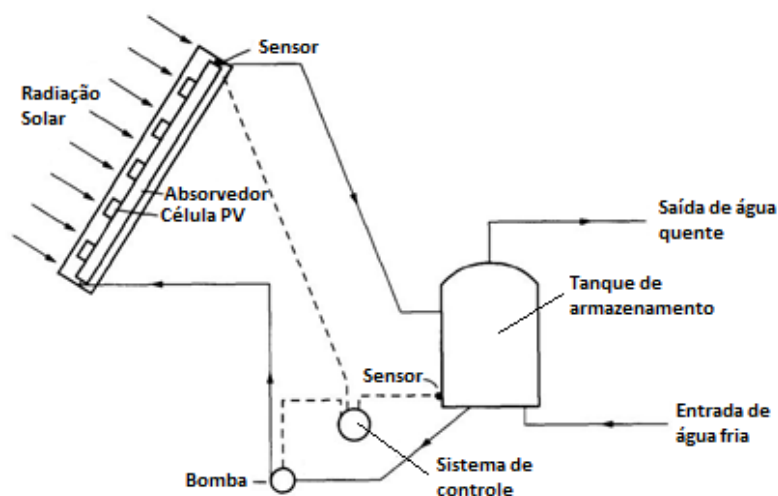
Fonte: (Ancines, 2016, adaptado de Zondag et al, 2003)

Como apenas um certo intervalo do espectro de radiação solar é utilizado para a geração de pares elétrons-lacuna, em todo o resto do mesmo não há conversão de energia elétrica. Os fótons com maiores comprimentos de onda somente dissipam energia em forma de calor para as células. Os módulos fotovoltaicos comuns convertem de 4 a 17% a energia solar incidente em eletricidade. Além disso cerca de 50% da energia solar incidente (sem considerar a parte refletida) é convertida em calor, resultando em um aumento da temperatura das células fotovoltaicas, chegando em valores de até 50°C acima da temperatura ambiente.

Ao utilizar um coletor híbrido térmico fotovoltaico, as células fotovoltaicas são resfriadas e, conseqüentemente, diminui o efeito de dois fatores no sistema: danos permanentes na estrutura do módulo devido ao estresse térmico e a queda na eficiência da célula. (Chow, 2010).

O sistema de funcionamento de um coletor solar híbrido se assemelha à combinação de um sistema fotovoltaico com um sistema de aquecimento solar de coletores de placas planas. Um exemplo de funcionamento do coletor solar híbrido é descrito por Garg, 1994: o coletor é montado no telhado ou num ponto favorável em altura e irradiância solar e o tanque de armazenamento é localizado na sua posição usual, perto do nível do solo. A água circula por meio de uma bomba e de canos que ligam o coletor ao tanque, transportando a água aquecida do coletor que absorveu energia do módulo fotovoltaico até o tanque. Assim a água quente pode ser utilizada. Concomitantemente, água a menor temperatura é adicionada ao tanque a mesma taxa, havendo assim um ciclo de aquecimento de água.

Figura 2 - Disposição esquemática de um sistema solar híbrido de circulação direta forçada.

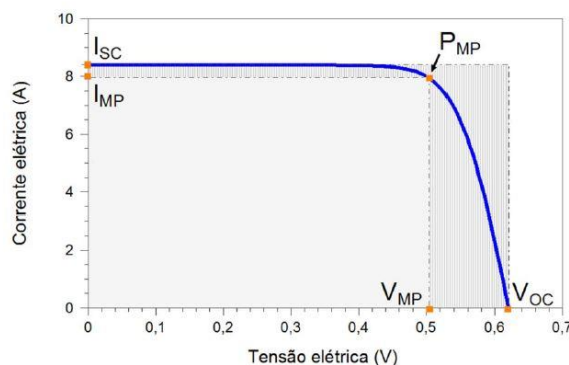


Fonte: (Adaptado de Garg, 1994).

2.2 MÓDULO FOTOVOLTAICO

A corrente elétrica em uma célula fotovoltaica pode ser considerada como a soma da corrente de uma junção pn no escuro (diodo semiconductor) com a corrente gerada pelos fótons absorvidos da radiação. Esta corrente em função da tensão no dispositivo, denominada curva I-V, ou curva característica, apresentada na Figura 3, apresenta as principais características de um módulo fotovoltaico, como a tensão de circuito aberto (V_{OC}), corrente de curto-circuito (I_{SC}), tensão de máxima potência (V_{MP}), corrente de máxima potência (I_{MP}) e o ponto de máxima potência (P_{MP}).

Figura 3 - Curva I-V de um módulo fotovoltaico.



Fonte: (Pinho e Galdino, 2014)

O produto da tensão de máxima potência pela corrente de máxima potência resulta na máxima potência do módulo fotovoltaico cuja unidade utilizada é o W_p (watt-pico).

A partir da curva também pode se determinar a figura de mérito denominada de Fator de Forma, a qual é definida como a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto circuito com a tensão de circuito aberto.

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1)$$

A eficiência do módulo é definida como razão entre a potência elétrica produzida pela potência de energia solar incidente sobre o plano do módulo:

$$\eta_e = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{G_T A} = \frac{P_{mp}}{G_T A} \quad (2)$$

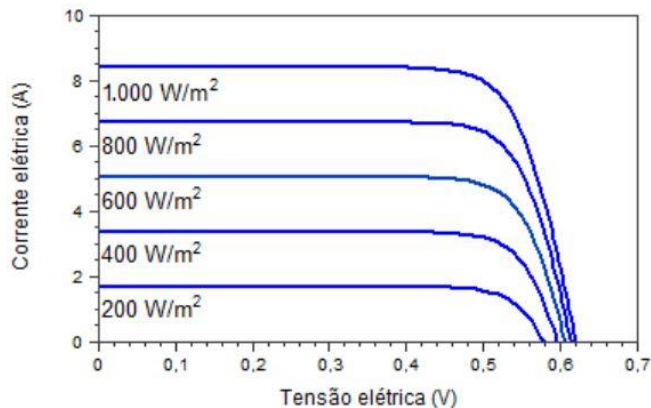
na qual G_T é a irradiância solar incidente sobre o plano do módulo, em W/m^2 , e A é a área da célula, em m^2 .

As células fotovoltaicas funcionam a partir da irradiância solar incidente sobre as mesmas. A corrente elétrica gerada aumenta linearmente com a irradiância incidente. A tensão de circuito aberto, por sua vez, aumenta de forma logarítmica, se mantida a mesma temperatura. A relação da corrente de curto circuito de uma célula fotovoltaica com a irradiância é dada por

$$I_{sc} = I_{sc-stc} \times \frac{G_T}{1000} \quad (3)$$

na qual, I_{sc} é corrente de curto-circuito do módulo, para a irradiância G_T e uma temperatura de 25°C e I_{sc-stc} é corrente de curto-circuito do módulo nas STC.

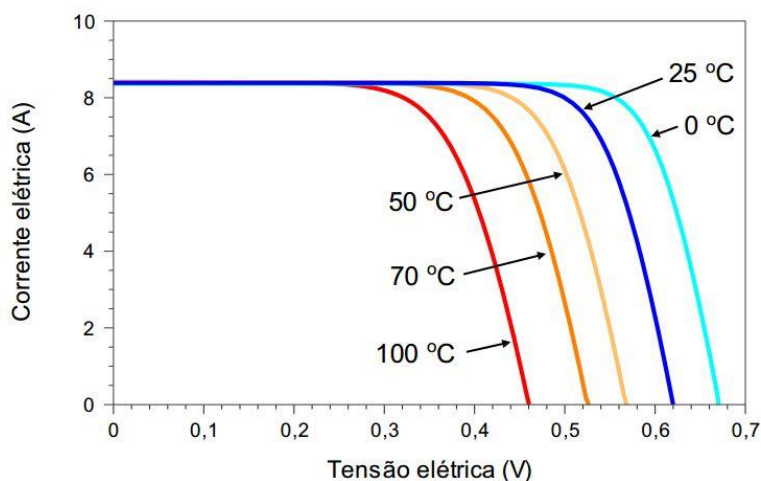
Figura 4 - Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25°C .



Fonte: (Pinho e Galdino, 2014)

O desempenho das células fotovoltaicas é afetado pela temperatura ambiente e pela incidência de irradiância solar, pois ambas aumentam a sua temperatura. Em um cenário de irradiância constante, com variação estrita à temperatura da célula, percebe-se que o aumento da temperatura provoca queda na tensão da célula. A corrente, diante do cenário exposto, sofre um pequeno aumento, quase desprezível. Portanto, como a potência de uma célula é definida como o produto da tensão pela corrente, com o aumento da temperatura da célula, a mesma apresenta uma menor potência.

Figura 5 - Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (para irradiância de 1000W/m^2 , espectro AM 1,5).



Fonte: (Pinho e Galdino, 2014)

Dessa forma, pode-se definir o coeficiente γ de variação da potência com a temperatura:

$$\gamma = \frac{\Delta P_{MP}}{\Delta T} \quad (4)$$

na qual ΔP_{MP} é a variação da potência máxima para uma variação de temperatura de célula ΔT . Esse coeficiente γ é negativo, com valor típico de $0,5\%/^{\circ}\text{C}$. Conseqüentemente, quanto menor o valor γ de um módulo, menor será a sua perda de potência devida à temperatura. (Pinho & Galdino, 2014)

3 MONTAGEM DO COLETOR ADAPTADO

A seguir mostra-se as etapas para a montagem da adaptação do módulo fotovoltaico em um coletor híbrido térmico fotovoltaico.

3.1 ESCOLHA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Para realizar uma comparação entre o modelo híbrido e o fotovoltaico, é necessário utilizar dois módulos fotovoltaicos idênticos entre si pois, desta forma, garante-se que a geração de energia elétrica de ambos é semelhante sobre as mesmas condições.

O primeiro passo para a seleção dos módulos utilizados foi a determinação de suas curvas características. Para isso, diversos módulos foram ensaiados e tiveram seus parâmetros analisados, tais como tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, tensão de máxima potência, corrente de máxima potência e a máxima potência. Todos os ensaios foram realizados com o auxílio de um simulador solar do modelo Pasan SunSim 3C. O mesmo possui uma lâmpada que emite um espectro equivalente ao solar atravessando uma massa de ar de 1,5 e com um fluxo de 1000 W/m^2 . Também, todos os módulos estavam na temperatura padrão de 25°C , respeitando o limite de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

A partir disso, os módulos escolhidos foram da marca Trina Solar, modelo TSM 245PC05A, com as suas características descritas na Tabela 1, por apresentarem as medidas mais semelhantes entre si.

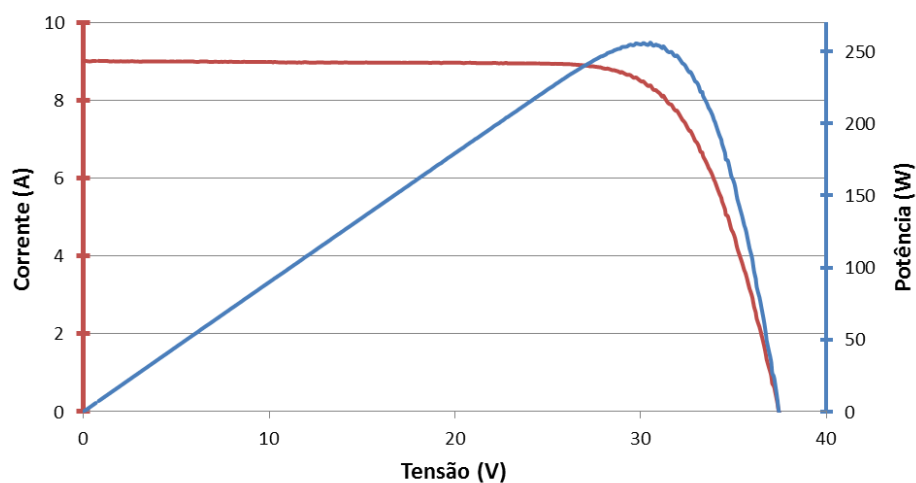
Tabela 1 - Dados obtidos a partir do ensaio dos módulos escolhidos para o experimento.

Características	PV	PV/T
Potência Máxima [W]	255,58	253,93
Voc [V]	37,46	37,32
Isc [A]	9,02	8,97
Vmp [V]	30,15	30,02
Imp [A]	8,48	8,46
Fator de Forma [%]	75,7	75,8
Eficiência do módulo [%]	15,7	15,6
Área [m^2]	1,64	1,64

Fonte: o autor

Com os dados do ensaio, foi possível determinar a curva característica dos módulos que, como ambos são iguais, conseqüentemente suas curvas características são iguais.

Figura 6 – Curva característica dos módulos fotovoltaicos

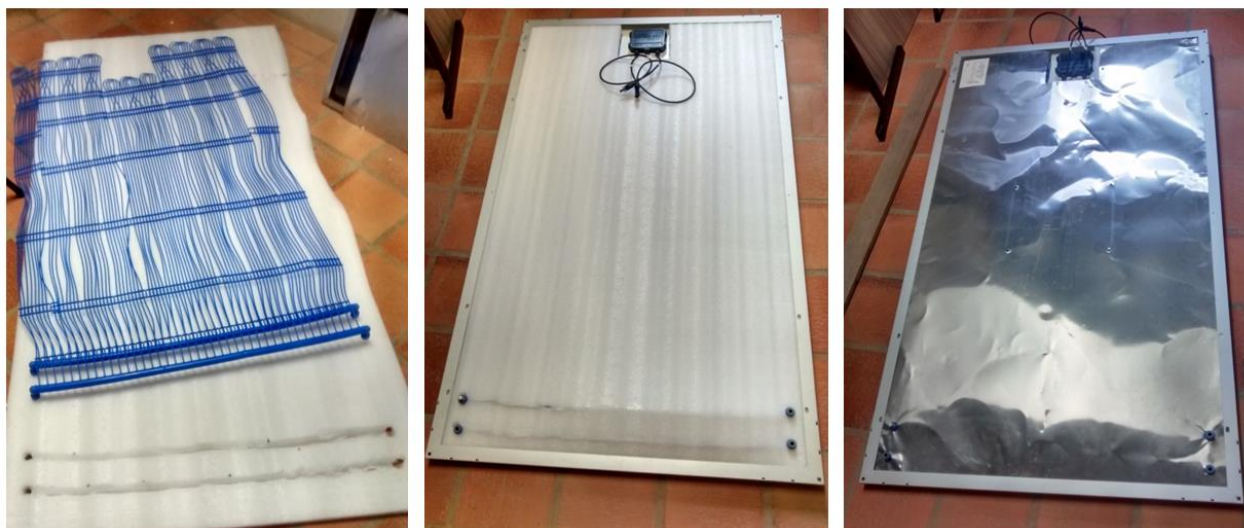


Fonte: o autor

3.2 MONTAGEM

O protótipo foi construído a partir de uma serpentina obtida de um coletor híbrido térmico fotovoltaico comercial, ilustrada na Figura 7, que foi fixada com adesivo de silicone, na parte inferior de um dos módulos fotovoltaicos descrito anteriormente e isolado térmicamente com uma camada de isopor e uma chapa de alumínio para fechar o protótipo. Dessa forma, com a fixação direta da serpentina ao módulo e isolado termicamente, o coletor híbrido apresenta uma possível melhoria na troca de calor entre o módulo e a água circulante.

Figura 7 - Etapas de montagem de um coletor híbrido: a) Serpentina e isolante térmico; b) Serpentina e isolante térmico fixados ao fundo do módulo; c) Chapa de alumínio fechando o coletor híbrido térmico fotovoltaico.



a)

b)

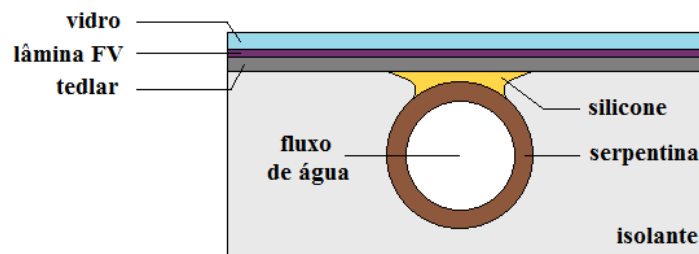
c)

Fonte: o autor

Dessa forma, foi criada uma adaptação de coletor híbrido térmico fotovoltaico, um pouco diferente do modelo convencional descrito na conceituação. No modelo descrito, há um condutor térmico, formado por uma chapa e os tubos pelos quais há circulação de água, além de um vidro e uma camada de ar.

Enquanto que, no modelo adaptado, há apenas uma serpentina fixada com cola de silicone diretamente ao módulo fotovoltaico. O esquema na Figura 8 explicita como ficou a versão final da adaptação realizada.

Figura 8 – Esquema simplificado do coletor adaptado



Fonte: o autor

4 METODOLOGIA DE TESTES

Para avaliar a performance dos módulos, foi preciso instrumentá-los numa bancada e submetê-los às mesmas condições de testes, conforme descrito nesta seção.

4.1 BANCADA DE TESTES

Foi utilizada uma bancada de ensaio disponível no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABSOL), a qual foi montada por Manea, 2012 e Rosa, 2012 para realizar ensaios de coletores térmicos. A bancada possui espaço para ensaiar mais de um coletor simultaneamente, além de ter sido montada sobre um eixo giratório de 360°, permitindo com que os coletores possam acompanhar a trajetória solar diária. Os módulos foram instalados a uma inclinação de 45° em relação ao plano do solo, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Foto da bancada experimental no LABSOL

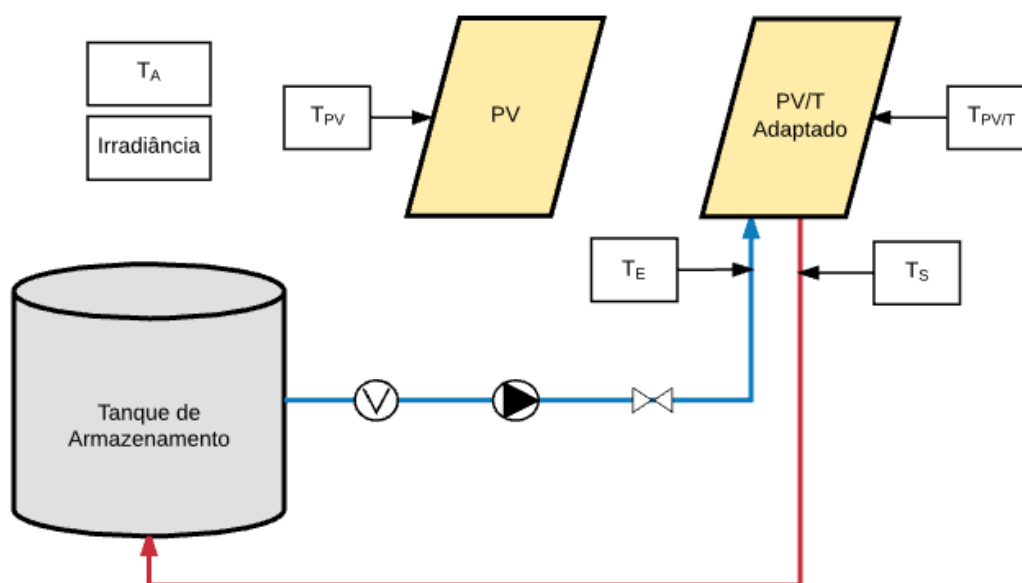


Fonte: o autor

4.2 CIRCUITO TÉRMICO

O coletor adaptado foi conectado a um sistema de circulação de água fechado desenvolvido por Manea, 2012 e Santos, 2016 a partir da norma NBR 15747-2 (ABNT, 2009). O circuito térmico é composto por um tanque de armazenamento, uma bomba de circulação de água, um medidor de vazão, uma válvula para controle de vazão e o coletor híbrido térmico fotovoltaico adaptado. O percurso realizado pela água segue a ordem na qual os componentes foram descritos anteriormente e é ilustrado na Figura 10. Assim, água a uma vazão constante circula por todo o circuito, sendo aquecida no módulo adaptado e entregue ao tanque de armazenamento para fechar o circuito.

Figura 10 - Esquema do circuito hidráulico utilizado.



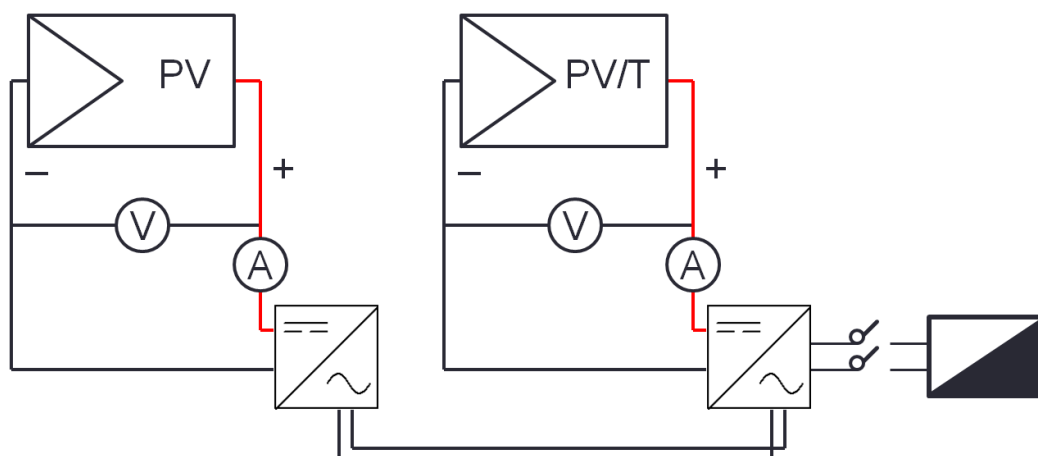
Fonte: o autor

Nesse processo são medidas as temperaturas nas seções de entrada e saída do coletor PV/T adaptado, bem como a temperatura dos módulos e a ambiente. Além do mais, a irradiância no plano dos módulos é medida.

4.3 CIRCUITO ELÉTRICO

Cada módulo fotovoltaico foi conectado a um microinversor com função de operação constante no ponto de máxima potência e com uma saída de tensão c.a. de 220V. As saídas dos dois microinversores foram conectadas em paralelo ao quadro geral de baixa tensão do local, passando por um disjuntor bifásico. O esquema de conexão dos módulos está ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Esquema da conexão elétrica dos módulos.



Fonte: o autor

Para realizar a medição de tensão de saída dos módulos, o sistema de aquisição de dados foi conectado diretamente aos terminais de saída dos módulos. Para medição das correntes, resistores *shunt* de 5 m Ω foram utilizados e suas medidas também foram lidas pelo sistema de aquisição. Os microinversores utilizados foram da MicroReplus 250-A, com eficiência máxima de 96,3% e eficiência de seguimento de máxima potência mínimo de 99,5%. (ReneSola, 2017)

4.4 SENSORES

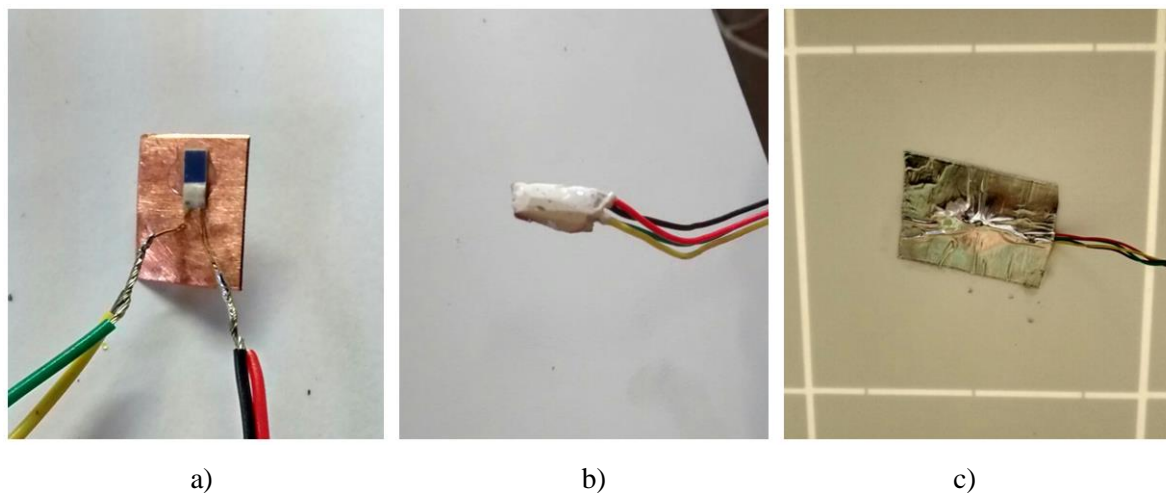
4.4.1 RADIAÇÃO

Para medir a irradiância sobre os módulos, instalou-se ao mesmo plano dos módulos um piranômetro da marca Delta Ohm, modelo LP PYRA 02, primeira classe conforme ISO 9060 (*Standard & Pyranometer Measurement Accuracy*) e uma incerteza de 3% FDE (FDE=1000 W/m²). (Toro, 2015)

4.4.2 TEMPERATURA

A fim de medir as temperaturas, sensores do tipo Pt100 foram colocados na seção de entrada e na seção de saída do coletor. Conforme a calibração realizada por Manea, 2012, os sensores de temperatura apresentam uma incerteza de medida de diferença temperatura entre os sensores de 0,04 °C e uma incerteza total para medidas absolutas de 0,12°C. Novos sensores Pt100 foram montados com a finalidade de medir a temperatura dos módulos fotovoltaicos. Para isso, sensores desencapsulados foram fixados em chapas de cobre. Logo após, os sensores foram cobertos com araldite para obter uma maior resistência mecânica e impermeabilidade. Por último, os sensores foram cobertos com pasta térmica e fixados no centro das células fotovoltaicas com uma fita adesiva de alumínio.

Figura 12 - Fotos da montagem e fixação do sensor de temperatura dos módulos: a) Fixação de um Pt100 desencapsulado em uma chapa de cobre; b) Cobertura de araldite; c) Sensor fixado no centro de uma célula do módulo.



Fonte: o autor

Como os módulos não apresentam uma temperatura uniforme, os sensores foram fixados na parte inferior do centro de uma das células mais próximas ao ponto central do módulo. Para cada módulo, apenas um sensor foi utilizado, e esta medida foi considerada como a temperatura média do módulo. Estes sensores foram calibrados para estes testes e apresentam suas curvas de calibração no ANEXO A.

4.4.3 VAZÃO

Para realizar a medição de vazão de água no sistema fechado, fez-se uso de um medidor de vazão da marca YOKOGAWA, modelo AXF010G, com diâmetro interno de 10 mm com capacidade de mensurar vazões máximas de 47,123 L/min e no intervalo mínimo entre 0 e 0,472 L/min. O medidor de vazão foi aferido por Toro, 2015, cuja exatidão corresponde a 0,35% da velocidade medida, apresentando uma incerteza total na vazão volumétrica de 0,043L/min.

4.4.4 AQUISIÇÃO DE DADOS

A leitura dos dados foi realizada através de um sistema de aquisição de dados digital da marca Agilent, modelo 34970A, conectado a um computador para armazenar os dados que foram medidos a cada 30 segundos.

4.5 TESTES

Após a montagem de todos equipamentos e sensores na bancada, iniciou-se a aquisição de dados. Para a realização do teste considerou-se uma vazão mássica estipulada conforme a norma brasileira NBR 15747-2 (ABNT, 2009) que diz que a mesma deve ser ajustada a 0,02kg/s por metro quadrado da área de abertura. Dessa forma, fixou-se a vazão a um valor de 0,0327kg/s.

Primeiramente, para calcular uma performance térmica do coletor híbrido, algumas premissas devem ser consideradas sobre a circulação de água pelo mesmo. Essas premissas são: água como líquido incompressível e variações de energia potencial e cinética insignificantes. (Incropera, 2007)

Com os dados das temperaturas nas seções de entrada e saída do módulo adaptado pode-se realizar o cálculo da razão da entalpia pela taxa de radiação incidente no plano do coletor, definido como a performance térmica (Per_T):

$$Per_t = \frac{\dot{m} C_{p,água} (T_s - T_e)}{G_T A_C} \times 100\% \quad (5)$$

na qual \dot{m} é a vazão mássica da água circulante no coletor, em kg/s, T_s a temperatura na seção de saída do coletor, em °C, T_e a temperatura na seção de entrada do coletor, em °C e $C_{p,água}$ é o calor específico da água, em kJ/kg.K que varia em função da temperatura da mesma e pode ser calculada a partir da Equação 6.

$$C_{p,água}(T) = Y_0 + Y_1 T + Y_2 T^2 + Y_3 T^3 + Y_4 T^4 + Y_5 T^5 \quad (6)$$

na qual $Y_0 = 4,217$; $Y_1 = -3,358 \times 10^{-3}$; $Y_2 = 1,089 \times 10^{-4}$; $Y_3 = -1,675 \times 10^{-6}$; $Y_4 = 1,309 \times 10^{-8}$ e $Y_5 = -3,884 \times 10^{-11}$, em kJ/kg°C e T é média das temperaturas de entrada e saída, em °C.

Com a vazão determinada, calcula-se o número de Reynolds do escoamento interno de água pela serpentina, através da Equação 7:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (7)$$

na qual ρ é a densidade do fluido, em kg/m³, v a velocidade do escoamento, em m/s, D o diâmetro interno da serpentina, em m, e μ a viscosidade dinâmica do fluido, em kg/m.s. (Incropera, 2007)

Para a água operando em uma faixa de temperatura de 10°C a 40°C, calcula-se o número de Reynolds entre 7500 e 14500. A partir desse resultado, verificou-se que o escoamento pela serpentina é turbulento, implicando em uma maior troca térmica entre o fluido e as paredes internas da serpentina, em comparação a um escoamento laminar.

4.6 INCERTEZAS

Uma análise dos dados medidos envolvendo os erros deve ser levada em consideração. O cálculo de incerteza associada à medida do instrumento utilizado é relacionado com a leitura do sistema de aquisição de dados, a incerteza na medida da grandeza e a incerteza no ajuste das curvas experimentais de calibração.

Concernente às grandezas obtidas em função das diversas variáveis medidas, a verificação é satisfeita pelo método de propagação de incerteza de medição. Esse método é um procedimento no qual se estima a propagação do desvio padrão de uma grandeza R a partir do desvio padrão de suas variáveis dependentes x_1 até x_n .

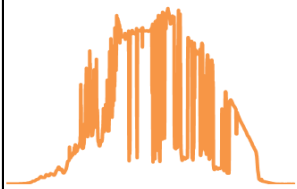
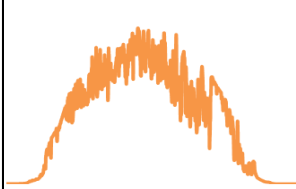

$$\omega_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \omega_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \omega_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \omega_n\right)^2} \quad (8)$$

Na qual ω_R é a incerteza propagada da grandeza R e ω_1 e ω_n são as incertezas das variáveis independentes. (Holman, 1994).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os testes dos módulos ocorreram no período de maio a junho de 2017, no qual dados de diversos dias foram medidos. Por fim, considerou-se 3 dias como base de estudo, sendo estes 2, 15 e 23 de junho, cada um apresentando características distintas. Inicialmente uma análise de geração de energia elétrica horária foi feita para comparar a energia total produzida dos módulos nos três dias supracitados.

Tabela 2 – Energia elétrica produzida horária

Energia Produzida Horária [Wh]						
Horário	2-jun		15-jun		23-jun	
	PV	PV/T	PV	PV/T	PV	PV/T
5-6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6-7	0,2	0,2	0,3	0,3	0,0	0,0
7-8	7,2	7,0	29,5	29,1	1,3	1,2
8-9	30,7	30,5	104,1	107,2	80,7	79,8
9-10	85,7	86,0	138,0	138,2	136,2	136,2
10-11	158,8	159,3	159,4	159,5	165,9	169,1
11-12	196,3	196,9	179,1	177,2	181,6	185,3
12-13	180,7	182,1	158,1	158,1	185,8	188,0
13-14	113,6	113,0	124,6	124,6	176,2	177,5
14-15	69,6	69,3	124,1	124,1	150,8	151,8
15-16	84,7	83,2	58,0	57,7	114,8	114,6
16-17	23,4	23,9	8,6	8,4	58,4	57,3
17-18	0,1	0,1	0,0	0,0	1,1	1,1
18-19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	951,0	951,5	1083,9	1084,4	1252,7	1261,9
Perfil de Irradiância Solar Diário [W/m²]						

Fonte: o autor

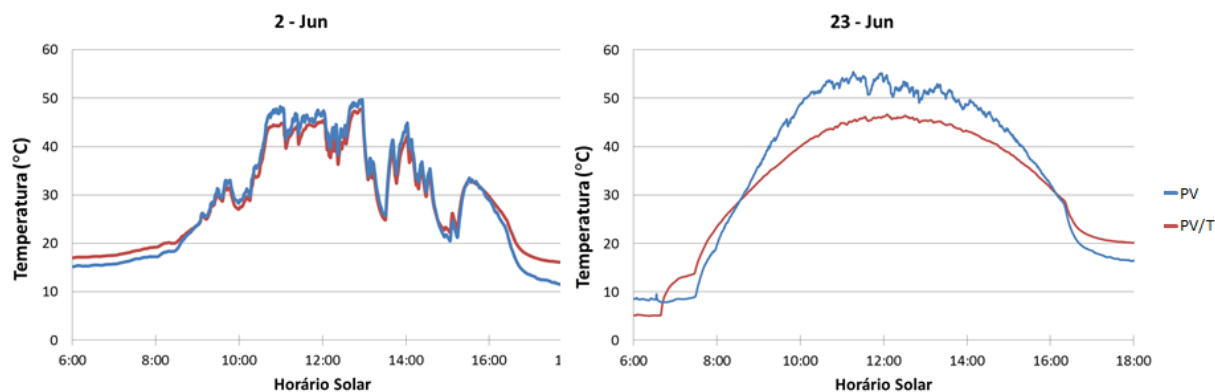
Como os dias 2 e 23 apresentaram a maior diferença no perfil de irradiância solar diário, eles foram selecionados para as análises apresentadas nas próximas seções. O dia 24 de junho (que não se encontra na Tabela 2) foi utilizado para realizar um estudo de comparação de desempenho entre os módulos, porém sem circulação da água no coletor adaptado. Neste dia, o perfil de irradiância solar diário foi semelhante ao apresentado no dia 23, sem presença de nuvens. Todos os dados apresentados foram corrigidos para a hora solar verdadeira.

5.1 ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Comparando o perfil diário dos três dias analisados, na Tabela 2, identificou-se que o dia que não apresentou nuvens e consequentemente apresentou uma maior irradiação diária total, foi o que teve a maior produção de energia elétrica dos módulos.

Além disso, há uma variação na energia total produzida nos módulos PV e PV/T, sendo essa diferença maior no dia 23 de junho, com um valor de 9,2 Wh. O dia 2 de junho manifestou uma diferença de 0,5 Wh. Constatando essa diferença, analisaram-se as temperaturas dos dois módulos em cada dia.

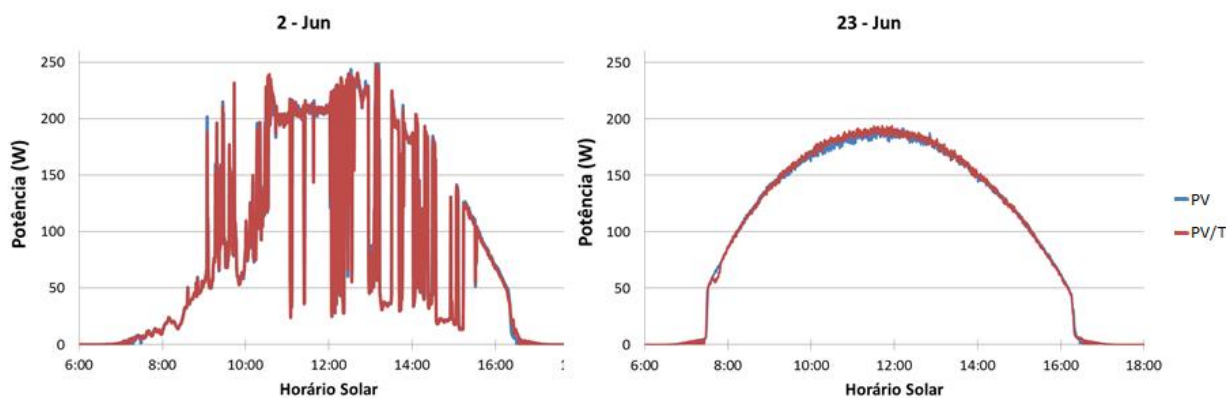
Figura 13 - Temperatura dos módulos durante os dias 2 e 23 de junho.



Fonte: o autor

Percebe-se que no dia 2 de junho houve uma diferença entre as temperaturas dos módulos inferior à do dia 23. Ao calcular uma temperatura média dos módulos, ponderada pela energia elétrica produzida, chega-se aos valores de 37,3°C e 36°C para os módulos PV e PV/T, no dia 2 de junho. No dia 23, as temperaturas médias foram de 40,6°C para o híbrido e de 46,1°C para o módulo. Esses valores ressaltam essas diferenças entre as temperaturas para cada dia. Em seguida, analisou-se a curva de potência elétrica diária dos módulos.

Figura 14 – Potência em função do tempo para os dias 2 e 23 de junho

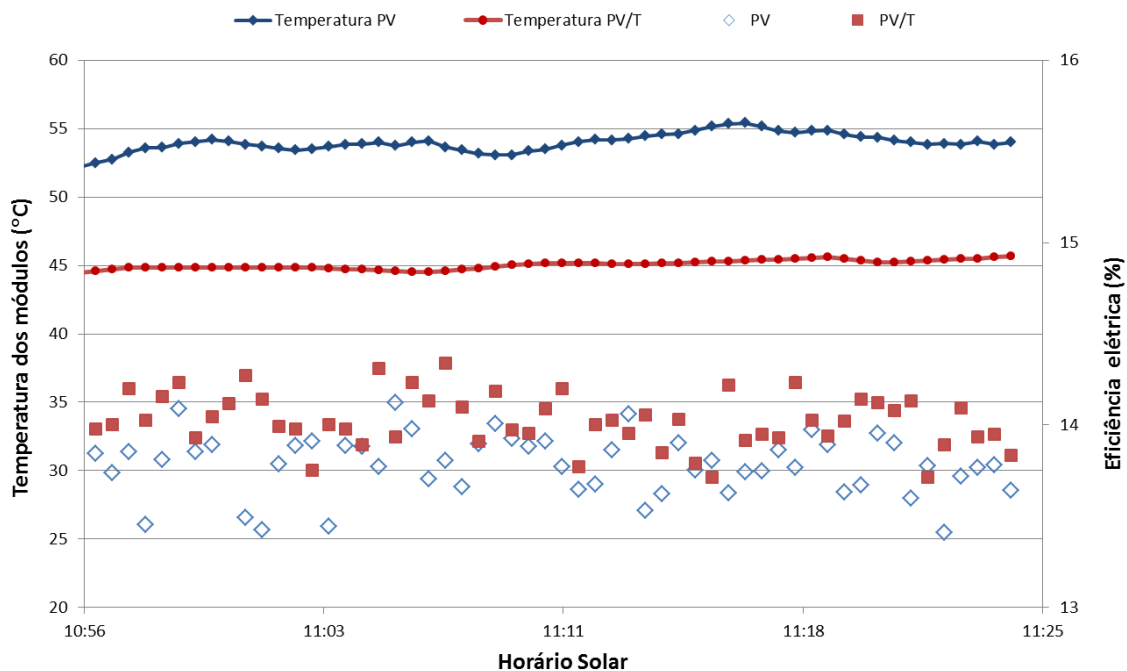


Fonte: o autor

Conforme o esperado, as potências dos módulos apresentam o mesmo formato da curva de irradiância solar de cada dia. Verificou-se também uma diferença entre as potências no dia 23 de junho, o que resulta nos 9,2 Wh produzidos a mais do PV/T em comparação do PV.

Conjuntamente, uma análise de cálculo de eficiência elétrica para cada medição foi realizada. Para isso foi considerado um período no qual há a maior variação de temperatura entre os módulos. Entretanto, para obter uma boa análise, foi escolhido como segundo fator um período na qual as temperaturas e a irradiância solar incidente apresentassem valores constantes. Neste caso, para o dia 23 de junho, foi analisado o período das 10:56 até as 11:24, com os dados mostrados na Figura 15.

Figura 15 - Eficiência elétrica com G_T média = 815 W/m^2 e T_a média = $24,1^\circ\text{C}$, no dia 23 de junho



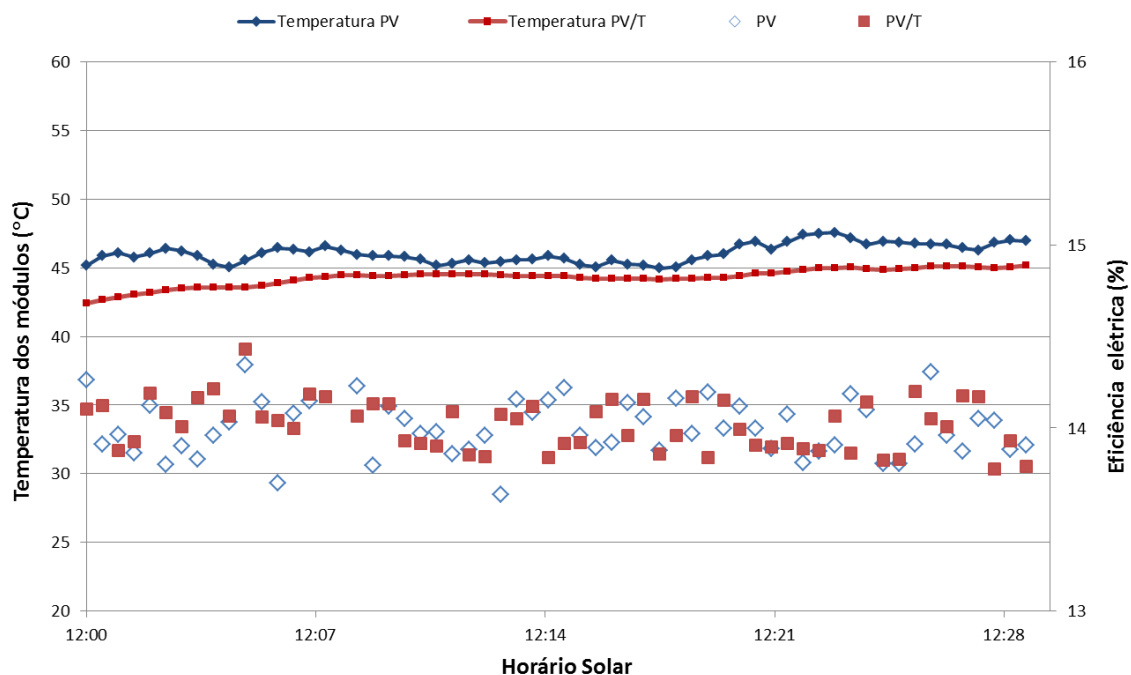
Fonte: o autor (com base em Ancines, 2016)

Nesse período de análise, constatou-se uma diferença nas eficiências elétricas dos módulos. O módulo PV apresentou eficiências elétricas no intervalo de 13,4% a 14,1%, com uma média de 13,78%. Já o módulo PV/T obteve medidas no intervalo de 13,7% a 14,4%, com um valor médio de 14,04%.

Quanto à temperatura dos módulos, foi medido no módulo fotovoltaico em média, uma temperatura de $53,9^\circ\text{C}$, enquanto que no coletor híbrido esse valor foi de 45°C . A diferença manteve uma média de $8,9^\circ\text{C}$, apresentando um valor máximo de 10°C .

Esse comportamento ocorre devido à água circulante pelo módulo adaptado, isto é, o fluxo de água trocou calor com o módulo constantemente e por consequência esfriou o módulo PV/T. Ao mesmo tempo, a água absorve essa energia térmica, elevando a sua temperatura. Analogamente, o mesmo estudo foi realizado para o dia 2 de junho, como é apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Eficiência elétrica com G_T média = 906 W/m² e T_a média = 21,8°C, no dia 2 de junho.



Fonte: o autor (com base em Ancines, 2016)

Para o dia 2 de Junho, constatou-se uma superposição dos pontos de eficiência elétrica dos módulos. O intervalo das eficiências dos módulos PV e PV/T ficou de 13,6% a 14,3% e de 13,8% a 14,2%, respectivamente. Ao comparar as médias, o valor de ambos ficou muito próximo, uma média de 13,93% para o módulo comum e de 13,97% para o PV/T. Em relação à temperatura, a diferença das médias diminuiu para 1,8°C. A temperatura média do PV foi de 46,1°C enquanto que a do PV/T foi de 44,3°C. Dessa forma, percebeu-se o efeito da diferença de temperatura dos módulos nas suas eficiências.

Vale salientar, também, que as variações das eficiências se devem justamente aos microinversores utilizado que, ao procurar o ponto de máxima potência dos módulos acaba por variar a tensão dos mesmos, resultando nessa pequena flutuação da eficiência.

5.2 ANÁLISE TÉRMICA

Uma análise de toda a parte térmica relacionada ao coletor híbrido térmico fotovoltaico adaptado foi feita nos mesmos dias mostrados na subseção anterior. Assim, chega-se aos seguintes valores de performance térmica (Per_T), utilizando a Equação 5, para os dias analisados:

Tabela 3 - Performance térmica (Per_t) do módulo híbrido adaptado

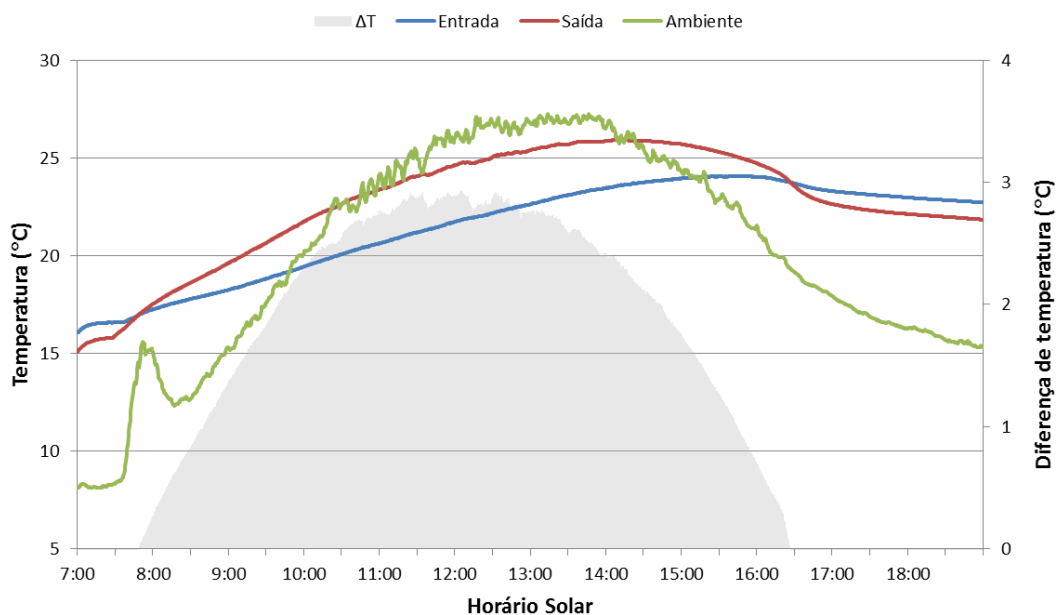
Horário	2-jun	15-jun	23-jun
7-8	0,00%	0,00%	0,00%
8-9	0,00%	13,94%	14,98%
9-10	12,45%	18,33%	23,04%
10-11	14,45%	21,81%	26,90%
11-12	16,55%	23,07%	28,00%
12-13	17,18%	24,92%	28,54%
13-14	14,91%	24,39%	29,58%
14-15	16,14%	23,34%	30,17%
15-16	9,13%	21,16%	27,35%
16-17	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: o autor

Conforme os valores indicados pela tabela, os maiores desempenhos térmicos para os dias 2, 15 e 23 de junho são 17,18%, 24,92% e 30,17%, respectivamente. Também percebe-se que a performance, no dia 23 de junho não varia conforme o valor da irradiância solar. Isto é, os maiores valores não estão no horário das 11 às 12 horas, ou entre as 12 e às 13 horas, e sim nos horários 13-14 e 14-15.

Abaixo, apresenta-se a variação diária das temperaturas nas seções de entrada e de saída do coletor, e a temperatura ambiente. Ademais, é mostrada a diferença entre as temperaturas de entrada e saída.

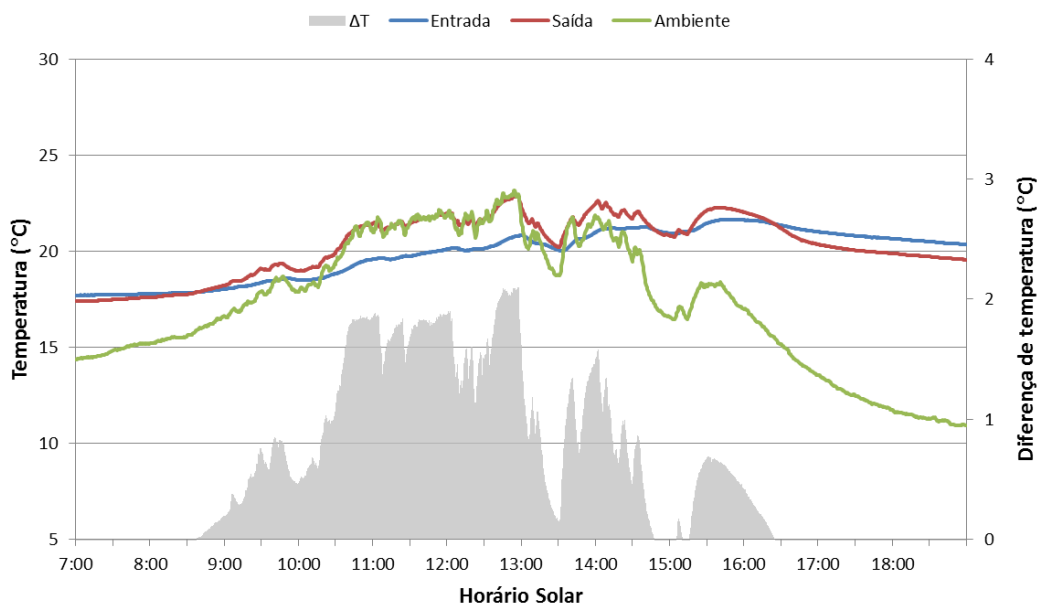
Figura 17 - Temperaturas ao longo do dia 23 de junho



Fonte: o autor

A Figura 19 ilustra um aumento constante da temperatura de entrada no módulo, influenciando a temperatura de saída do mesmo. A diferença as duas temperaturas (ΔT) começa a apresentar valores maiores do que zero um pouco antes das 8 horas da manhã, alcançando o seu pico ao meio-dia solar, com um valor de 2,9°C e depois decaindo novamente até chegar a um valor nulo às 16:30. Na Figura 20 é apresentado os dados do dia 2 de junho, o qual obteve uma performance térmica inferior ao dia 23.

Figura 18 – Temperaturas ao longo do dia 2 de junho



Fonte: o autor

No dia 2 de junho, não há um comportamento constante de elevação da temperatura de entrada da água. Entretanto, a temperatura de saída do coletor apresentou uma variação similar à temperatura ambiente. Ao analisar a diferença entre as temperaturas nas seções de entrada e saída (ΔT), constatou-se que a mesma apresenta valores diferentes de zero a partir das 8:40. A partir deste horário, essa diferença varia bastante com o passar do tempo, chegando a um pico de 2,1°C às 13 horas e apresentando valores nulos por volta das 15 horas. Conforme a situação do dia 23 de junho, a partir das 16:30 a água quente para de ser aquecida.

5.3 ANÁLISE DO MÓDULO ADAPTADO SEM CIRCULAÇÃO DE ÁGUA

Foi também analisado o comportamento do módulo PV em relação ao PV/T em uma situação na qual não há circulação de água através do mesmo. Esta situação poderia ser causada por algum problema, como falha na bomba hidráulica de circulação, ou na operação do conjunto térmico do sistema, por exemplo. Dessa forma, os dois módulos foram testados, com a bomba hidráulica desligada isto é, sem circulação de água, no dia 25 de junho. Sobre o perfil solar do dia, o mesmo foi igual ao dia 23 de junho, sem nuvens.

Na Tabela 4 é mostrada a produção horária de energia pelos dois módulos. Dessa vez, o módulo fotovoltaico apresentou uma produção superior ao módulo adaptado, resultando em um valor total de 1304,9 Wh diários em relação a 1239,6 Wh produzidos pelo PV/T.

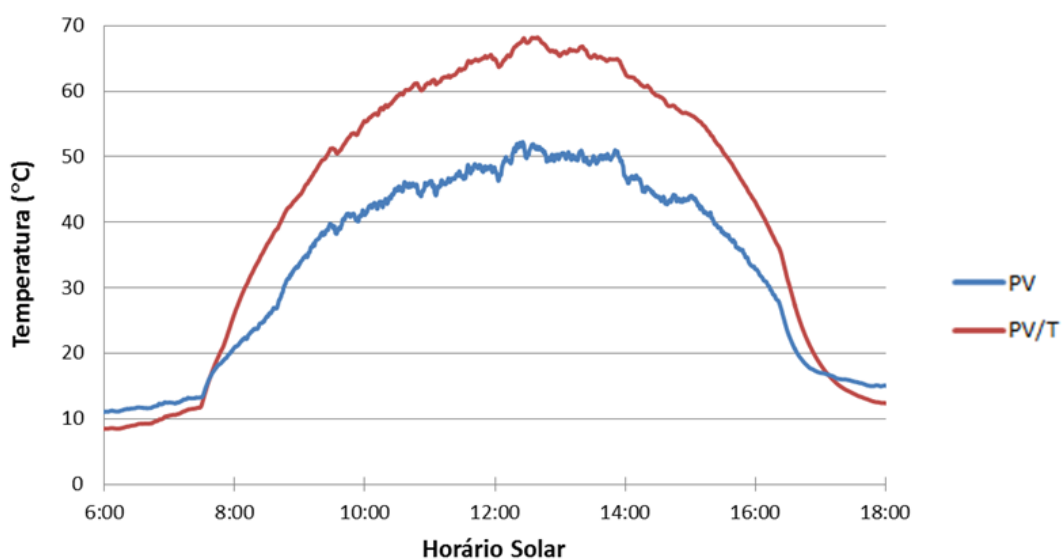
Tabela 4 - Energia produzida no dia 24 de junho

Energia Produzida Horária [Wh]		
Horário	24-jun	
	PV	PV/T
5-6	0,0	0,0
6-7	0,2	0,3
7-8	32,7	32,4
8-9	112,4	110,0
9-10	156,1	150,6
10-11	183,4	173,9
11-12	194,8	183,3
12-13	190,6	178,7
13-14	170,9	161,9
14-15	144,6	136,5
15-16	97,7	92,0
16-17	21,3	20,1
17-18	0,1	0,1
18-19	0,0	0,0
TOTAL	1304,9	1239,6

Fonte: o autor

Portanto, a análise realizada confirma o aumento da temperatura do módulo híbrido, acima da temperatura do módulo fotovoltaico, que justificaria a diminuição da sua eficiência elétrica.

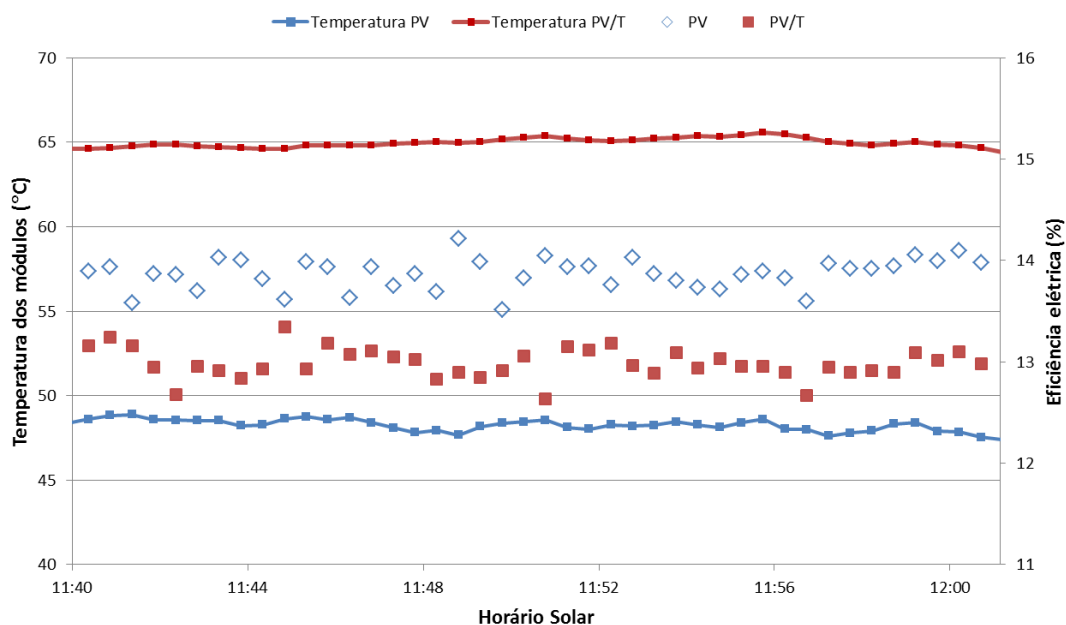
Figura 19 - Temperatura dos módulos no dia 24 de junho



Fonte: o autor

Nesta situação, o módulo PV/T apresentou temperaturas superiores ao PV durante todo o dia, chegando a uma diferença de até 17,6°C. Ao analisar também as eficiências elétricas dos módulos, mostradas na Figura 18, verifica-se o desempenho inferior do módulo PV/T.

Figura 20 - Eficiência elétrica com G_T média = 862 W/m² e T_a média = 25,7°C, no dia 24 de junho



Fonte: o autor (com base em Ancines, 2016)

A média das eficiências foi de 12,99% e 13,87% para o coletor PV/T e o PV, respectivamente. Isso ocorre devido ao módulo adaptado não estar com água circulando pelo mesmo. Ou seja, não há troca térmica entre o módulo e água. Assim, como há uma camada isolante no coletor PV/T, a dissipação de energia por convecção na face traseira é insignificante, resultando em um maior acúmulo de energia e uma temperatura mais elevada.

5.4 ANÁLISE DAS INCERTEZAS

Os resultados de incerteza obtidos para a eficiência térmica dos coletores foram determinados a partir das incertezas experimentais das grandezas, como a taxa mássica, o calor específico, a diferença de temperatura entre a saída e a entrada de cada coletor, a irradiância e a área de cada coletor na obtenção de cada curva de eficiência.

Como neste trabalho se fez uso de instrumentos já calibrados, foram utilizadas as incertezas apresentadas dos mesmos. Logo, as grandezas com seus respectivos valores de incerteza estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de incerteza das grandezas.

Grandeza	Valor de Incerteza
Corrente (I)	±0,005 A
Tensão (V)	±0,005 V
Irradiância (G_T)	±3% FDE
Área do coletor (A_C)	±0,01 m ²

Fonte: (Ancines, 2016)

Com todos os valores de incerteza dos parâmetros utilizados no cálculo da eficiência elétrica para cada coletor foi possível encontrar a incerteza referente aos pontos medidos, utilizando a Equação 9.

$$\omega_{\eta_e} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_e}{\partial V} \omega_V\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_e}{\partial I} \omega_I\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_e}{\partial G} \omega_{G_T}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_e}{\partial A} \omega_{A_C}\right)^2} \quad (9)$$

na qual ω_{η_e} , ω_V , ω_I , ω_{G_T} e ω_{A_C} são as incertezas propagadas da eficiência elétrica, da corrente, da irradiância e da área do coletor, respectivamente. Os valores obtidos da incerteza a cada ponto utilizado para determinar a curva da eficiência elétrica, tanto do coletor híbrido térmico fotovoltaico quanto do fotovoltaico ficou em 3,1%.

Para o caso da análise de potência produzida horária, somente é necessário aferir as incertezas relacionadas às medições de corrente e tensão dos módulos.

$$\omega_P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial V} \omega_V\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I} \omega_I\right)^2} \quad (10)$$

O que resultou em um valor de incerteza propagada de 0,16%, validando os dados de geração diária de energia dos módulos.

Para calcular as incertezas em relação à análise térmica, os dados da Tabela 6 foram utilizados.

Tabela 6 - Valores de incerteza das grandezas relacionadas à análise térmica

Grandeza	Valor de Incerteza
Vazão mássica (\dot{m})	$\pm 0,0007 \text{ m}^3/\text{s}$
Diferença de temperatura entre entrada e saída (ΔT)	$\pm 0,04 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura ambiente (T_a)	$\pm 0,12 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura de entrada (T_e)	$\pm 0,012 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura de saída (T_s)	$\pm 0,012 \text{ }^\circ\text{C}$
Irradiância (G_T)	$\pm 3\% \text{ FDE (FDE = } 1000\text{W/m}^2\text{)}$
Área do coletor (A_C)	$\pm 0,01 \text{ m}^2$

Fonte: (Ancines, 2016)

Com esses valores da Tabela 6, a incerteza de medição da performance térmica foi calculada pelo mesmo método utilizado anteriormente, porém utilizando a Equação 11.

$$\omega_{Per_t} = \sqrt{\left(\frac{\partial e_{th}}{\partial \dot{m}} \omega_{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\partial e_{th}}{\partial C_{p,\text{água}}} \omega_{C_{p,\text{água}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial e_{th}}{\partial \Delta T} \omega_{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\partial e_{th}}{\partial G} \omega_{G_T}\right)^2 + \left(\frac{\partial e_{th}}{\partial A} \omega_{A_C}\right)^2} \quad (11)$$

na qual ω_{Per_t} , $\omega_{\dot{m}}$, $\omega_{C_{p,\text{água}}}$, $\omega_{\Delta T}$, ω_{G_T} , ω_{A_C} são as incertezas propagadas da razão entre a variação de entalpia pela taxa de radiação incidente no coletor, da vazão mássica, do calor específico da água, da diferença de temperatura entre as seções de entrada e saída, da irradiância e da área do coletor, respectivamente.

Para os valores obtidos, do coletor híbrido térmico fotovoltaico e do módulo fotovoltaico convencional, sua incerteza calculada foi de 4,6%.

6 CONCLUSÃO

Em relação ao trabalho apresentado, primeiramente foi mostrada a situação brasileira em relação a sistemas de aquecimento solar. Logo após, foi apresentado o conceito de coletor híbrido térmico fotovoltaico que atua tanto na geração de energia elétrica quanto como um sistema de aquecimento de água solar. Por último, algumas metodologias e estudos foram introduzidos para avaliar o desempenho dos coletores híbridos.

Foi realizada a adaptação de um coletor híbrido a partir de um módulo fotovoltaico convencional e, após instrumentá-lo foi testado juntamente com um outro módulo fotovoltaico com características iguais em uma bancada de testes. A partir dos resultados dos testes, que foram realizados em três dias com características climáticas distintas, foram analisadas as variáveis elétricas e térmicas do sistema. Em relação a parte elétrica, o coletor híbrido térmico fotovoltaico adaptado apresentou valores de energia elétrica produzida superiores ao módulo fotovoltaico, como consequência de uma temperatura de operação inferior em relação ao PV. Sendo a máxima diferença de energia elétrica produzida de 9,2 Wh no dia 23 de junho. Entretanto, para os outros dias, com um perfil diferente de irradiância solar, pouco se diferenciaram os valores de potência elétrica e energia elétrica produzida.

Uma análise do sistema sem circulação de água também foi feita e foi confirmada a diminuição da eficiência elétrica do coletor híbrido. Este fato ocorre pelo mesmo apresentar uma maior isolamento térmica, elevando a sua temperatura de operação em relação ao módulo fotovoltaico. Na análise térmica do sistema do coletor híbrido, verificou-se um valor performance térmica máximo de 30%, e uma máxima diferença entre as temperaturas de entrada e saída de 2,9°C. Por último, as incertezas relacionadas a cada grandeza calculada foram determinadas, apresentando valores que não desconsideraram os resultados dos testes.

O estudo realizado apresentou resultados da comparação de um módulo fotovoltaico com um coletor híbrido em apenas algumas situações. Entretanto, tendo em vista que vários fatores possam implicar diretamente no seu desempenho, tais como o modo de operação de um sistema térmico, sazonalidade, localização, entre outros, um estudo mais detalhado da performance de um coletor híbrido é necessário. Apesar disso, as análises realizadas exaltam as características e potencialidade do coletor, para produzir energia elétrica de maneira mais eficiente que o módulo convencional e aquecer água para um processo térmico.

6.1 PROPOSTAS FUTURAS

Para uma melhor análise de comparação entre o módulo fotovoltaico e o coletor híbrido térmico fotovoltaico adaptado sugere-se a aplicação de testes em mais dias, abrangendo todas as estações do ano. Dessa forma, seria possível conhecer melhor seu comportamento em uma vasta gama de condições. Além disso, a realização dos ensaios para a obtenção da curva de eficiência térmica do coletor híbrido resultaria em um maior conhecimento sobre o coletor adaptado, podendo a partir disso ser comparado com outros coletores comerciais. Em relação aos ensaios, pode-se também aplicar testes com diversas vazões de água pelo coletor híbrido, justamente para avaliar seu comportamento em função das mesmas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15747-2 - Sistemas Solares Térmicos e Seus Componentes - Coletores Solares Parte 2: Métodos de Ensaio**, Rio de Janeiro, 2009.

ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. **Energia Solar Térmica, Participação na Matriz Energética e Contribuições Socioeconômicas ao Brasil**, São Paulo, 2014.

ANCINES, C.A. **Comparação entre o desempenho de um coletor híbrido térmico fotovoltaico com um coletor plano e um módulo fotovoltaico convencional**. Dissertação de Mestrado. PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

CHARALAMBOUS, P.G. et al., 2007. **Photovoltaic thermal (PV / T) collectors : A review. , 27**, pp.275–286.

CHOW, T.T., 2010. **A review on photovoltaic / thermal hybrid solar technology**. *Applied Energy*, 87(2), pp.365–379. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037>. Acesso em 10 de Maio de 2017.

GARG, H.P., 1994. **Some aspects of a pv/t collector forced circulation flat plate solar water heater with solar cells**.

HOLMAN, J.P., **Experimental Methods for Engineers**, McGraw-Hill, New York, 6th ed. 1994.

INCROPERA, P. F. et al.; **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**, sixth Edition, John Wiley & Sons, 2007.

ISO. International Standard Organization. **ISO 9060 – Specification and Classification of Instruments for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation**. 1990.

MANEA, T. F. **Desenvolvimento de uma Bancada para Ensaios de Coletores Solares de Tubos de Vidro a Vácuo**. Dissertação de Mestrado. PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, CEPEL - CRESEB, Rio de Janeiro, 2014.

RAWAT, P., KUMAR, P., Performance Evaluation of Solar Photovoltaic / Thermal (PV / T) System, **International Journal of Science and Research**, vol 4, no. 8, p. 1466-1471, 2015.

RENESOLA. **ReneSola Micro Replus 250A Microinverter Manual**, p.10, ReneSola, China, 2017.

ROSA, F. N. **Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil**. Dissertação de Mestrado. PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

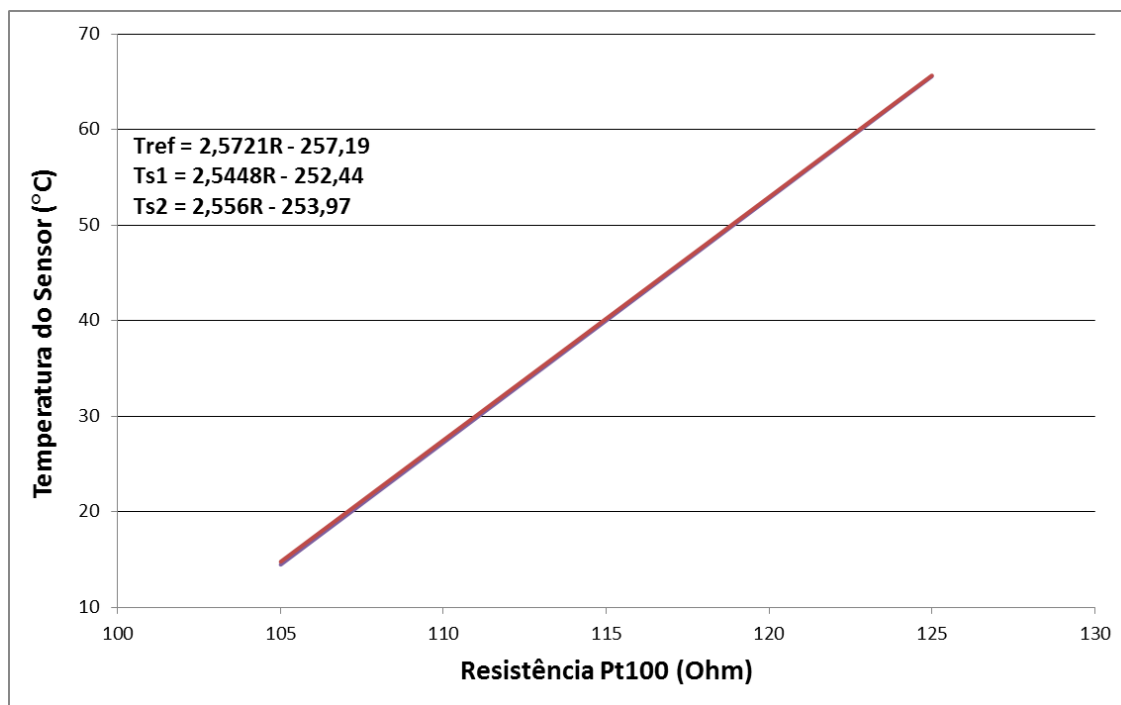
Santos, C. F. **Desenvolvimento e aplicação de estabilizador de temperatura para aperfeiçoamento de bancada de ensaio de coletores solares**. Dissertação de Mestrado. PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

TORO, J.D.N. **Análise Comparativa de um Sistema Passivo com um Sistema Ativo de Aquecimento de Água por Meio de um Coletor Solar de Tubos de Vidro a Vácuo**. Dissertação de Mestrado. PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

ZONDAG, H.A. et al. The yield of different combined PV-thermal collector designs. **Solar Energy**, v.74, p.253–269. March 2003.

8 ANEXOS

ANEXO A – Curvas de calibração dos sensores Pt100



Acima segue o gráfico das curvas de calibração dos sensores utilizados para medir as temperaturas dos módulos. O sensor de referência utilizado foi cedido pelo Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos (LETA) da UFRGS. O mesmo tinha sido calibrado em 2012 nos Laboratórios Especializados em Eletroeletrônica, Calibração e Ensaios (LBELO) na PUCRS.

T_{ref} indica a curva de calibração do mesmo e T_{s1} e T_{s2} são as curvas de calibração encontradas a partir do processo de calibração. R é a resistência medida pelo sensor, em Ohms.