

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA**

**ALESSANDRO BERTINATTO ZANCHI**

**COLETOR SOLAR HÍBRIDO FOTOVOLTAICO/TÉRMICO: uma  
análise sobre a eficiência de conversão de energia**

**São Leopoldo**

**2019**

ALESSANDRO BERTINATTO ZANCHI

**COLETOR SOLAR HÍBRIDO FOTOVOLTAICO/TÉRMICO: uma análise sobre a  
eficiência de conversão de energia**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para obtenção do título  
de Bacharel em de Energia, pelo Curso de  
Engenharia de Energia da Universidade do  
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Mário Henrique Macagnan

São Leopoldo

2019

## COLETOR SOLAR HÍBRIDO FOTOVOLTAICO/TÉRMICO: uma análise sobre a eficiência de conversão de energia

Alessandro Bertinatto Zanchi\*

Prof. Dr. Mário Henrique Macagnan\*\*

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma discussão teórica e experimental sobre a utilização da energia do Sol como fonte de energia. Tecnologias de conversão do espectro solar em energia útil são estudadas a mais de décadas e hoje, comercialmente, há a disseminação de duas tecnologias: fotovoltaica (FV) que converte diretamente a irradiação do Sol em energia elétrica e a térmica para aquecimento de um fluido. Contudo, a tecnologia FV possui eficiência de conversão energética baixa, assim, foi pensado e desenvolvido um sistema híbrido fotovoltaico térmico (FV/T) onde se utiliza a energia residual que não foi absorvida pelo efeito FV para o aquecimento de um fluido. As etapas do projeto foram: um esboço preliminar, montagem do equipamento e a simulação como efeito comparativo. Foi analisado o dia 20/11/2019 e verificou-se os seguintes dados: eficiência média teórica de 24,43 %, eficiência energética média experimental de 29,16 %, e com isso, dos 13,43 % de eficiência de conversão elétrica do módulo FV teórico aplicado o coeficiente térmico, foi possível aumentar em mais de 11 % da eficiência simulada. Já na experimental, esse valor aumenta, chegando em valores próximos de 16 % de incremento na conversão energética. Conclui-se que o sistema proposto é válido e maiores estudos devem ser feitos para uma possível utilização contínua em pequenas aplicações com o intuito da geração de energia elétrica e aquecimento de água.

**Palavras-chave:** FV/T, módulo solar híbrido, eficiência energética.

### 1 INTRODUÇÃO

A energia solar é uma fonte abundante e renovável, apresentando um grande potencial de utilização para as pessoas, desde o aquecimento de um fluido (água por exemplo), até a produção de energia elétrica (CHARALAMBOUS *et al.* 2007 *apud* Luzzi, 2017).

A utilização da energia solar para a geração da eletricidade ganhou força nos meados da década de 1970 quando houve a primeira grande crise de petróleo. Desde então, a demanda da energia solar vem crescendo e diversas tecnologias foram estudadas para ambas aplicações: aquecimento e geração elétrica (ERDIL, E., 2008).

Dados mostram que mais de 80% da radiação solar que incide em uma célula fotovoltaica não é convertida em eletricidade e é desperdiçada na forma refletida ou convertida em energia térmica. Isso implica no aumento da temperatura da célula reduzindo a

---

\* Graduando no curso de Engenharia de Energia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS. E-mail: a.bertinatto@gmail.com

\*\* Doutorado em Engenharia pela Universidade Politécnica de Madrid, Professor e Pesquisador no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNISINOS.

tensão de operação e, conseqüentemente, diminuindo a eficiência de conversão elétrica (JI *et al.*, 2006).

Levando em conta essa baixa eficiência de conversão, coletores fotovoltaicos/térmicos híbridos (FV/T) foram introduzidos no mercado para gerar eletricidade e calor em um processo único. Além de maiores eficiências na conversão de energia, o sistema híbrido é capaz de reduzir o uso do espaço de alocação e custos de produção por utilizar estrutura e suporte em comum, comparado ao sistema usual onde são colocadas ambas as tecnologias lado a lado (JI *et al.*, 2006). Adicionalmente, de acordo com Tyagi *et al.* (2012), no sistema híbrido há simultaneamente o resfriamento da célula fotovoltaica, mantendo a eficiência de conversão elétrica em níveis satisfatórios.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica necessária ao presente trabalho fornecendo embasamento teórico que permita a sustentação dos argumentos e soluções adotados neste artigo.

### 2.1 A Energia do Sol

A constante solar ( $G_{sc}$ ) é a potência emitida pelo Sol que alcança uma superfície fora da atmosfera terrestre e diversos estudos foram feitos para determinar seu valor, utilizando-se atualmente  $1367 \text{ W/m}^2$  (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Este valor é composto por aproximadamente 46% da radiação emitida na faixa do infravermelho, 46% na faixa da luz visível e 8% de radiação ultravioleta (MIGLIAVACCA *et al.*, 2014).

Pereira *et al.* (2017), expressam que o percurso da atmosfera até a superfície terrestre sofre influência de processos físicos que reduzem a intensidade da radiação. Essa interação entre Terra-Atmosfera enfraquecendo a intensidade da radiação solar é denominado de transferência radiativa.

Em um módulo FV que se utiliza o espectro eletromagnético para a produção de energia, há a incidência de dois componentes da irradiância solar, a direta e a difusa. A direta provém de uma linha reta imaginária entre o Sol e o equipamento, não sofrendo qualquer interferência radiativa de absorção e espelhamento da atmosfera. Já a difusa é proveniente das demais direções que são originadas pelo espalhamento da radiação por efeito de gases e particulados presentes na atmosfera (PEREIRA *et al.*, 2017).

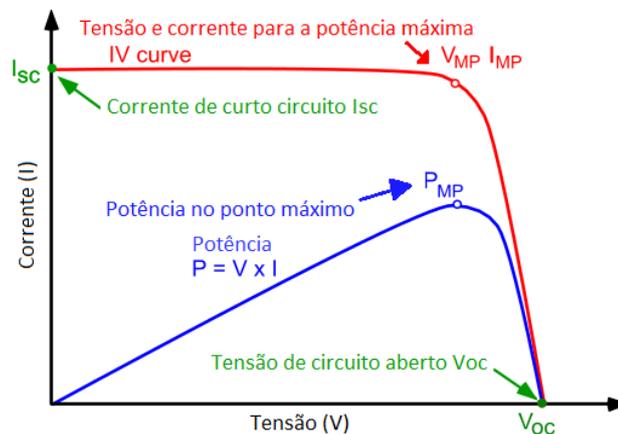
## 2.2 Energia Solar Fotovoltaica

Módulos fotovoltaicos são dispositivos que convertem parte do espectro solar diretamente em eletricidade sem a intervenção de motores térmicos e equipamentos rotativos. Uma célula fotovoltaica consiste em duas ou mais camadas de materiais semicondutores sendo o mais comum o silício pelas suas propriedades e abundância na natureza (KALOGIROU, 2014).

Villalva (2015), explica que os módulos fotovoltaicos são formados por um agrupamento de células conectadas eletricamente. Como cada célula é capaz de produzir apenas 0,6 V, são necessárias várias destas através de ligações elétricas em série para produzir uma tensão útil, sendo que modelos comerciais podem variar de 36, 54, 60 ou mais células para modelos desejados.

A Fig. 1 apresenta a curva característica de um módulo fotovoltaico, onde a corrente de curto-circuito,  $I_{sc}$ , surge quando se conecta os terminais do módulo fotovoltaico sem qualquer resistência e a tensão de circuito aberto,  $V_{oc}$ , é quando se mede os terminais do módulo antes de aplicar uma carga, resultando na máxima tensão disponível para o sistema (VILLALVA, 2015).

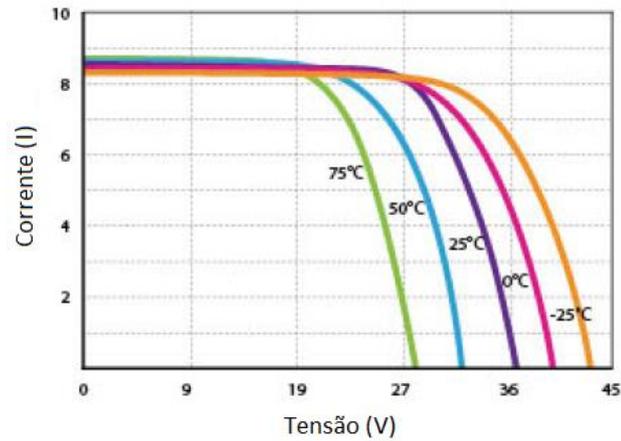
Figura 1 - Curva de corrente x tensão um módulo (ou célula) fotovoltaico (I x V).



Fonte: Adaptado de *FVeducation*

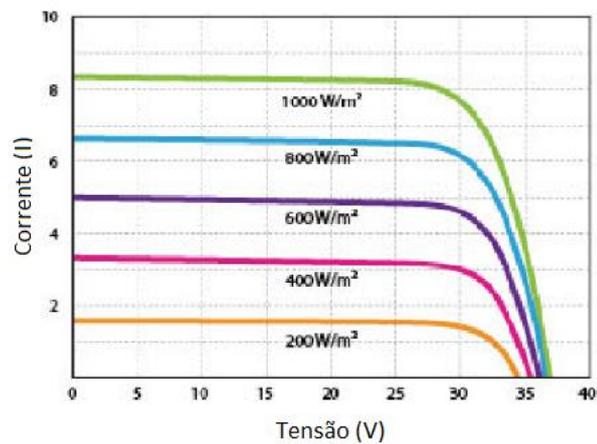
Villalva (2015), aponta também a influência da temperatura e a radiação que influenciam o comportamento do módulo fotovoltaico. Temperaturas baixas implicam em tensões mais elevadas e vice-versa. Já a corrente quase não se altera pela temperatura e sim pela influência da radiação incidente, conforme as Fig. 2 e 3, respectivamente, para a influência da temperatura e a radiação.

Figura 2 - Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de Era Solar 260 W (2015)

Figura 3 - Influência da irradiância solar na operação do módulo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de Era Solar 260 W (2015)

A ação da temperatura no módulo se dá pelo efeito do coeficiente térmico do dispositivo, em que cada fabricante verifica esses dados e o disponibiliza na folha de dados (*datasheet*). As curvas do módulo apresentado anteriormente, Era Solar 260 W, apresenta os coeficientes térmicos conforme mostrado na Tab. 1.

Tabela 1 - Coeficientes térmicos para o modelo Era Solar 260 W.

Temperatura operacional	-40 °C a 85 °C
Coeficiente de temperatura para $I_{sc}$	+0,08558%/°C
Coeficiente de temperatura para $V_{oc}$	-0,29506%/°C
Coeficiente de temperatura para $P_{mp}$	-0,38001% / °C

Fonte: Adaptado de Era Solar 260 W (2015)

Isso se traduz que, para cada grau de incremento de temperatura no módulo a partir da temperatura de teste, 25 °C, é aumentada minimamente a corrente de curto circuito, enquanto que a tensão de circuito aberto diminui, e o resultado implica em uma diminuição acentuada da potência do equipamento.

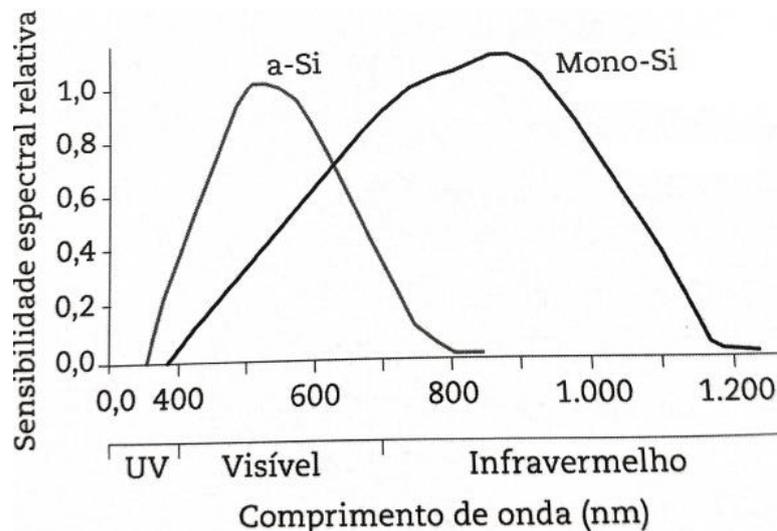
### 2.2.1 Eficiência em módulos fotovoltaicos

Zilles *et al.* (2017), comentam que a sensibilidade espectral é diferente para cada tecnologia de célula e isso diz respeito à capacidade de absorver a energia dos fótons da radiação solar em diferentes níveis de comprimento de onda.

A Fig. 4 representa essa sensibilidade espectral para as células de silício amorfo e monocristalino. Os valores de sensibilidade espectral estão normalizados e o valor correspondente ao número 1 no eixo da ordenada significa a máxima absorção de energia para determinado comprimento de onda (ZILLES *et al.*, 2017).

Zilles *et al.* (2017), ainda apontam que a não coincidência entre os máximos de energia para cada comprimento de onda do espectro solar faz com que nem toda a energia solar incidente seja aproveitada.

Figura 4 - Sensibilidade espectral em função do comprimento de onda.



Fonte: Adaptado de Goetzberger e Hoffmann (2005)

Por conta disso, cada tecnologia tem seu aproveitamento do espectro eletromagnético e não há equipamento capaz de absorver por completo a gama da radiação solar emitida pelo Sol.

A Tab. 2 apresenta as eficiências para alguns modelos de tecnologias presentes no mercado para algumas condições de trabalho. A diferença de eficiência do módulo para a célula se dá pela área de contato, onde a célula preenche 100% da área e o módulo contabiliza a estrutura, os contatos superficiais, entre outros fatores que diminuem sua área superficial, que impactam negativamente para esse valor (VILLALVA, 2015).

Tabela 2 - Comparação da eficiência de algumas células e módulos fotovoltaicos.

<b>Material da célula fotovoltaica</b>	<b>Eficiência da célula em laboratório, %</b>	<b>Eficiência da célula comercial, %</b>	<b>Eficiências dos módulos comerciais, %</b>
Silício monocristalino	24,7	18,0	14,0
Silício multicristalino	19,8	15,0	13,0
Silício cristalino de filme fino	19,2	9,5	7,9
Silício amorfo	13,0	10,5	7,5
Cobre-índio-gálio-selênio ( <i>CIGS</i> )	18,8	14,0	10,0
Telureto de cádmio ( <i>CdTe</i> )	16,4	10,0	9,0

Fonte: Adaptado de Villalva (2015)

## 2.3 Energia Solar Térmica

Kalogirou (2004), descreve vários tipos de coletores solares térmicos, sendo eles: placa-plana, tubos evacuados e concentradores tipo parabólicos ou Fresnel lineares, discos parabólicos e tipo torre central.

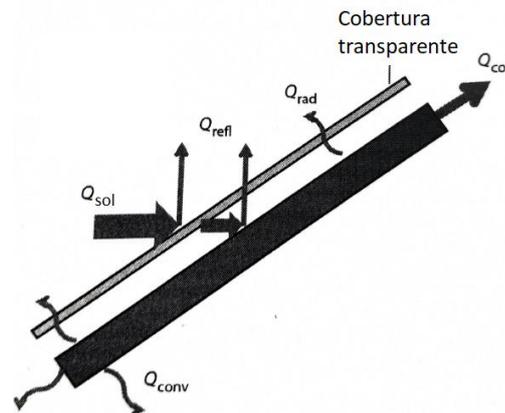
Esse capítulo tem por objetivo conceituar o coletor do tipo placa-plana que será o modelo adotado para o trabalho.

### 2.3.1 Coletor de placa-plana

Jäger *et al.* (2014), afirmam que o tipo de coletor térmico é determinado pelo quão eficiente a energia do Sol pode ser absorvida. Geralmente, esse equipamento consiste em uma superfície escura chamada de absorvedor e uma camada de proteção transparente, e seu funcionamento se deve pelo aquecimento da camada absorvedora e posteriormente essa energia é transferida para um fluido de trabalho e conduzida para um reservatório ou não.

Na Fig. 5 são representados, esquematicamente, os fluxos de potência envolvidos em um processo de conversão de energia térmica por um coletor de placa plana (FPC).

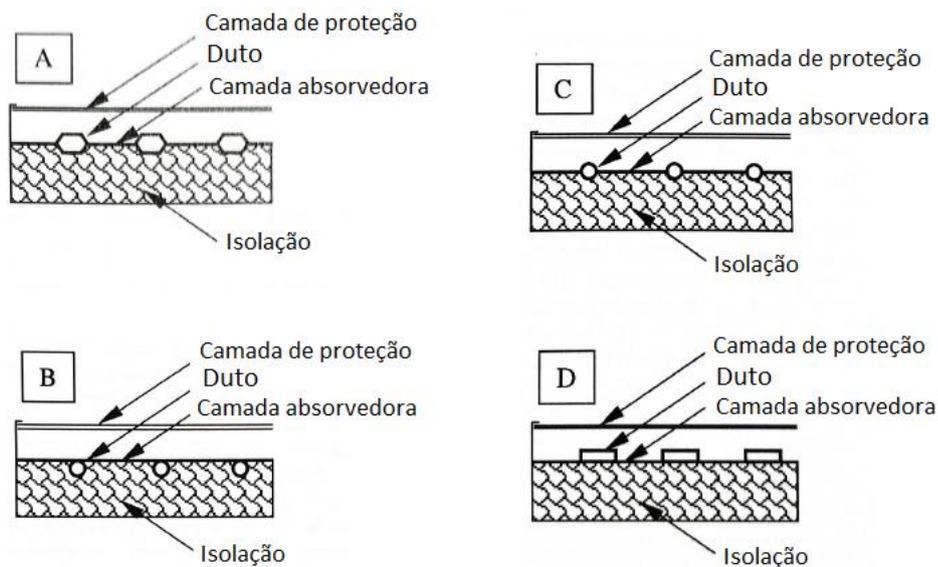
Figura 5 - Ilustração dos fluxos de energia em um FPC simples.



Fonte: Adaptado de Jäger *et al.* (2014)

Há algumas configurações testadas para FPC apontadas por Kalogirou (2004), como mostrado na Fig. 6, onde os desenvolvedores obtiveram diferentes graus de sucesso para cada modelo testado. A Fig. 6A apresenta um modelo em que há a união entre a superfície absorvedora e os dutos hexagonais de passagem do fluido, para garantir uma boa condutividade entre o metal e o fluido. A Fig. 6B e 6C apresentam um modelo mais simples, onde se utilizam tubos circulares abaixo e entre a camada absorvedora, respectivamente. Já a Fig. 6D apresenta um modelo onde se utilizam dutos retangulares em cima da camada absorvedora com o objetivo de melhorar a área de contato para maior transferência de calor.

Figura 6 - Tipos de FPC.



Fonte: Adaptado de Kalogirou, S. (2004)

Mais detalhes são dados a seguir sobre as camadas descritas na Fig. 6, de acordo com Kalogirou (2004):

- Camada de proteção: o vidro é o material mais utilizado para fornecer proteção física para os dutos e superfícies absorvedoras, pois é capaz de transmitir mais de 90% da radiação em baixos comprimentos de onda emitidos pelo Sol. Já os filmes plásticos apresentam boas características para a transmissão, mas se deterioram facilmente quando se eleva a temperatura do equipamento e, inclusive, são poucos plásticos disponíveis no mercado que podem resistir aos raios ultravioletas sem haver a deterioração das moléculas.
- Superfície absorvedora: a finalidade dessa superfície é absorver o máximo da irradiância que incide através da camada de proteção, perdendo uma pequena parcela para a atmosfera pela face superior e inferior, por meio da radiação e convecção, caso o sistema não for evacuado. A absorvidade da camada absorvedora depende da natureza do revestimento e do ângulo de incidência da radiação. Uma camada absorvedora ideal deve apresentar altos valores de absorvidade ( $\alpha$ ) e baixos valores de emissividade ( $\varepsilon$ ).
- Dutos: são necessárias algumas características para o dimensionamento adequado, como a pressão hidráulica exigida pelo sistema, características térmicas da solda dos dutos com a superfície absorvedora caso exista e a resistência à corrosão. Usualmente se utiliza o cobre por possuir esses critérios.
- Isolamento: exige-se um material que reduza as perdas térmicas pela condução e pela convecção dentro do coletor. Reis *et al.* (2011) apontam que fibra de vidro, espuma rígida de poliuretano e poliestireno expandido são materiais comumente utilizados, pois apresentam uma baixa condutividade térmica e um coeficiente de dilatação compatível com os demais componentes do coletor.

## 2.4 Sistema Híbrido FVT

Um sistema híbrido FV/T não apenas produz eletricidade pelo efeito fotovoltaico, mas também serve como absorvedor térmico em um processo simultâneo. As células fotovoltaicas utilizam uma fração da radiação solar incidente para produzir eletricidade e o que não é absorvido é desperdiçado em calor, principalmente nas células FV, aumentando sua temperatura e, conseqüentemente, reduzindo a eficiência de conversão (TYAGI *et al.* 2012).

A tecnologia FVT recupera uma parcela desse calor e a usa para aquecimento de um fluido de trabalho. Simultaneamente, há o resfriamento das células FV, mantendo a eficiência elétrica em níveis satisfatórios e, conseqüentemente, aumenta a eficiência de conversão, a princípio (TYAGI *et al.* 2012).

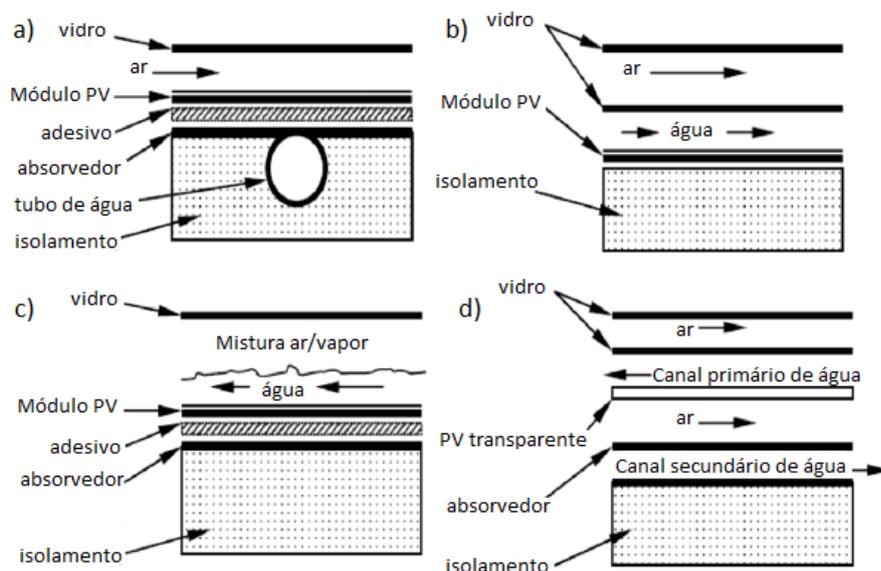
Diferentes tipos de coletores estão sendo usados comercialmente, como por exemplo o FVT/ar, FVT/água e coletor concentrador FV/T. Mostra-se no próximo tópico essas tecnologias e aplicações.

#### 2.4.1 Tipos de coletores FV/T

Zondag *et al.* (2003) apontam que todos os sistemas se constituem em uma lâmina FV que tem a função de ser a camada pré-absorvedora do sistema térmico. Nessa configuração, um equipamento pode ser criado para converter a energia solar em energia elétrica e térmica. Classifica-se os sistemas FV/T de acordo com o tipo de fluido de trabalho: água, ar e água/ar combinados e através disso, algumas configurações iniciais puderam ser organizadas:

- a) Coletor FV/T lâmina e tubo;
- b) Coletor FV/T de canal;
- c) Coletor FV/T de fluxo livre;
- d) Coletor FV/T de duplo absorvedor.

Figura 7 - Configurações básicas de coletores FV/T.



Fonte: Adaptado de Zondag *et al.* (2003)

A Fig. 7 mostra o sistema: a) lâmina e tubo é o modelo mais simples que integra um sistema FV em um coletor térmico sem qualquer modificação. O sistema b) de canal, impõe restrições na escolha do fluido de trabalho, pois esse material deve ter um espectro absorptivo diferente da camada FV à fim de poder passar a devida radiação para a conversão elétrica. O sistema c) de fluxo livre, não apresenta restrições quanto ao fluido de trabalho, mas impõe a característica transparente ao espectro solar, sendo a água a escolha adequada para baixas temperaturas. O sistema d) de duplo absorvedor, utiliza uma lâmina FV transparente como absorvedor primário e uma placa de metal preto como uma segunda camada absorvedora. Enquanto esse sistema indica uma eficiência térmica elevada, ele é bastante pesado (ZONDAG *et al.*, 2003).

Verifica-se que todos os sistemas são constituídos do revestimento do módulo fotovoltaico em uma estrutura à fim de manter todos os equipamentos estáveis. O modelo proposto para o estudo é de simples fabricação onde se utiliza o modelo a) lâmina e tubo, mas sem a estrutura de apoio externa, ou seja, há a fixação do absorvedor/tubo diretamente abaixo do módulo FV.

### **3 METODOLOGIA**

Dispõe-se neste capítulo os materiais utilizados na elaboração do projeto com suas respectivas propriedades e grandezas, juntamente com a devida abordagem metodológica adotada, divididos em subcapítulos respectivamente.

#### **3.1 Análise experimental do sistema FV/T**

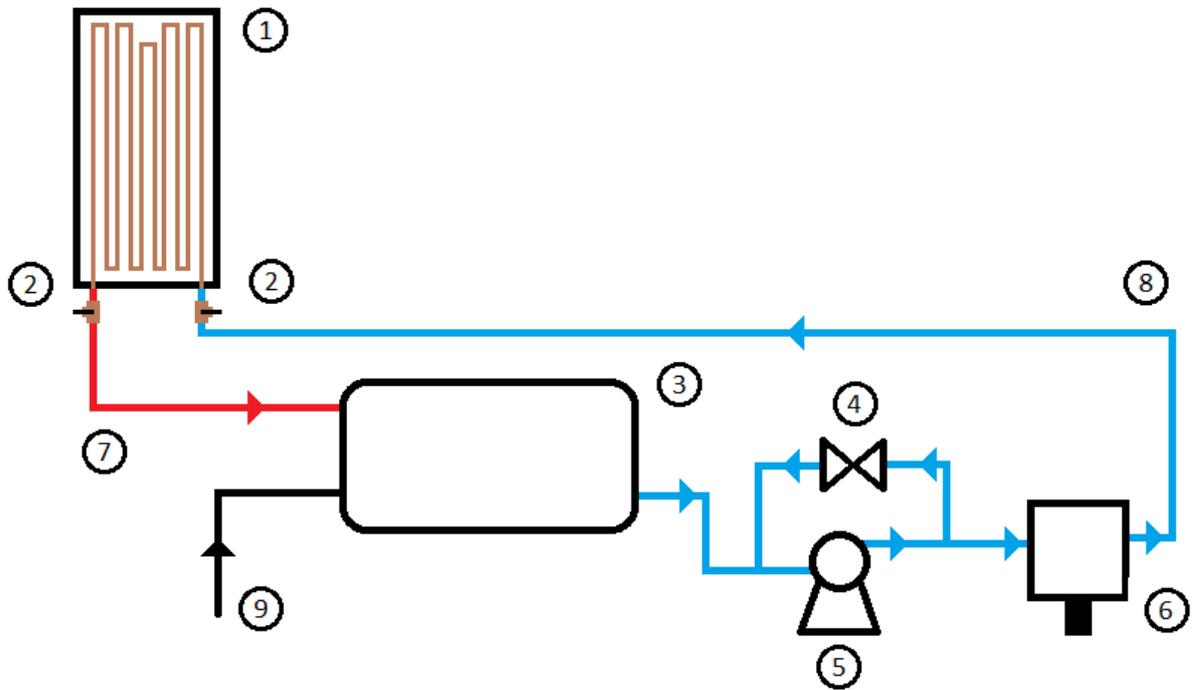
Neste capítulo é mostrada a análise experimental do sistema, através da descrição das etapas do desenvolvimento do protótipo e da bancada experimental, os materiais/equipamentos utilizados e as grandezas analisadas.

##### **3.1.1 Etapas da montagem experimental**

A montagem experimental é feita através de um esboço inicial da alocação dos componentes com o intuito de organizar o sistema de forma a proporcionar uma montagem adequada. A Fig. 8 apresenta um esquema do sistema onde estão dispostos os equipamentos

utilizados de maneira simplificada e a Fig. 9 apresenta o modelo FV/T proposto através da separação de camadas a fim de visualizar de forma clara a ordem montada.

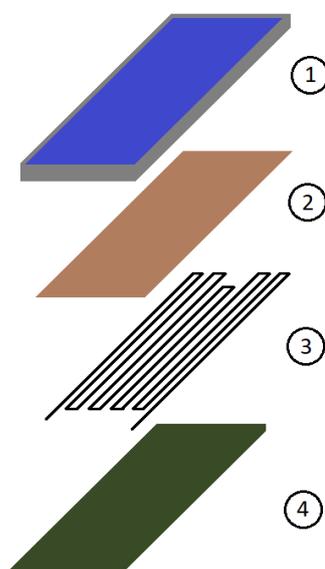
Figura 8 – Diagrama da bancada experimental.



Legenda:

1. Coletor FV/T;
2. Termorresistores PT-100;
3. Tanque térmico Komeco;
4. Sistema *by-pass* para controle de vazão;
5. Bomba hidráulica Texius TBHX BR;
6. Medidor de vazão Yokogawa AXF 0056;
7. Fluido quente na saída do coletor;
8. Fluido frio na entrada do coletor;
9. Fluido proveniente da distribuição da concessionária;

Figura 9 – Modelo do módulo FV/T



Legenda:

1. Módulo FV;
2. Chapa de cobre;
3. Tubo de cobre;
4. Isolamento em lâ de vidro.

Diante disso, descreve-se através de tópicos as etapas realizadas para a montagem do sistema:

- Verificação prévia do local de instalação no Laboratório de Fontes de Energias Renováveis na Universidade do Vale do Rio dos Sinos;
- Verificação de tubulações e equipamentos disponíveis no Laboratório, sendo eles a bomba hidráulica e o medidor de vazão, tubos de ½” rosqueados e tanque de armazenamento;
- Obtenção de equipamentos para a realização da montagem do sistema hidráulico (joelhos, emendas, redutores entre outros), lâ de vidro para isolamento do sistema FV/T, chapa e o tubo de cobre.
- Obtenção dos módulos FV cedidos pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

- Calibração dos sensores de temperatura PT-100 através de um sensor padrão calibrado;
- Confeção da serpentina manualmente e para as curvas a utilização de um dobrador de tubos;
- Soldagem manual de toda a superfície da serpentina com a chapa através da utilização das varetas de foscooper no processo de brasagem onde se utiliza um maçarico para liquefazer a solda. Nota-se que nesse processo houve implicações e a mais importante foi a não planicidade da chapa que pode ocasionar bolsas de ar entre a chapa metálica e a parte traseira do módulo FV, diminuindo a troca térmica e, conseqüentemente, a eficiência térmica do sistema;
- Montagem do sistema térmico na parte traseira de um dos módulos FV e posteriormente a aplicação da lã de vidro;
- Montagem dos módulos FV e FV/T em uma estrutura, com ângulo de inclinação de 30° apontados para o norte;
- Montagem das tubulações hidráulicas.

Pelas Fig. 10 a 13 pode-se ver o processo de montagem da bancada desenvolvida.

Figura 10 – Detalhe da conexão entre bomba e medidor de vazão e o sistema by-pass para o controle de vazão.

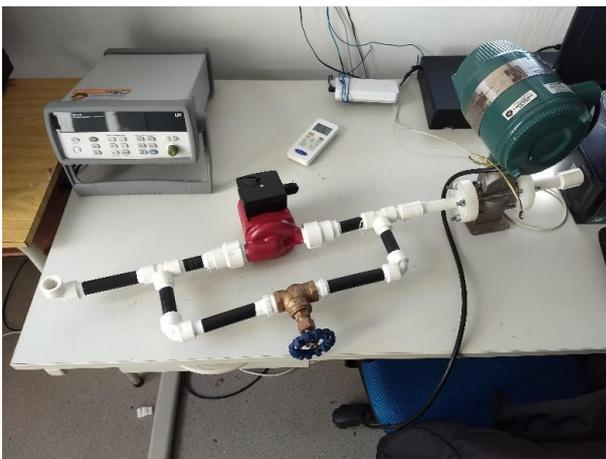


Figura 11 – Camada absorvedora montada contendo a chapa e o tubo de cobre.



Figura 12 – Sistema FV/T montado.



Figura 13 – Sistema de aquisição de dados.



Detalha-se os equipamentos utilizados na Tab. 3, onde é apontado a quantidade de materiais utilizados. Na Tab. 4 são descritas as propriedades dos módulos FV utilizados, com as propriedades disponibilizadas por Lenharo *Mega Store* onde não foi possível a obtenção da folha de dados original do fabricante e algumas propriedades necessárias e não fornecidas foram retiradas de outro módulo FV semelhante em tipo de célula (monocristalino) e a potência de projeto (100 W).

Tabela 3 – Lista dos equipamentos utilizados.

Quantidade	Equipamento	
2	Módulo FV modelo LMS-PSMONO-100W	
1	Chapa de cobre com 0,45 x 550 x 1190 mm	
10,54 m	Tubo de cobre de ¼"	
1	Válvula globo de ¾"	
1	Medidor de vazão Yokogawa AXF 0056	
1	Bomba hidráulica Texius TBHX BR 100 W	
1	Reservatório hidráulico Komeco 200 l	
15 varetas	Solda foscooper para junção do tubo com a chapa	
3	Termorresistor PT-100	Eq. 1 $T_{out}$ : $Y = 0,992 \cdot x + 0,0857$
		Eq. 2 $T_{in}$ : $Y = 1,0038 \cdot x - 0,0756$
		Eq. 3 $T_{pm}$ : $Y = 1,0049 \cdot x + 0,0103$
1	Termorresistor PT-100 para a calibração (Omega Calibration OM-121125200 calibrado dia 14/01/2019)	
1	Módulo Agilent 34970 A	
1	Piranômetro Eppley Radiometer PSP, calibração de $8,90 \times 10^{-6}$ V/Wm <sup>-2</sup>	
1	Anenômetro de conchas Adolf Thies	

Tabela 4 – Especificações técnicas do módulo FV.

Modelo: LMS-PSMONO-100W	Potência máxima (Pmax): 100 W
Tipo de célula: Monocristalina	Eficiência: 15,1 %
Tensão nominal (Vmp): 18,78 V	Coefficiente térmico de potência: -0,47 %/ °C
Corrente nominal (Imp): 5,34 A	Temperatura de Funcionamento: -40 °C ~ 85 °C
Tensão circuito-aberto (Voc): 22,54 V	Dimensões: 119,6 x 55,4 x 5,0 cm

Continuação	
Corrente curto-circuito ( $I_{sc}$ ): 5,85 A	Espessura do vidro: 3,2 mm
Marca: Lenharo	STC: AM 1.5 $E=1000 \text{ W/m}^2$ $T:25 \text{ }^\circ\text{C}$

Fonte: Adaptado de Lenharo *Mega Store* (2019)

Na Tab. 5 são apresentadas as devidas propriedades que são relacionadas com os materiais utilizados, juntamente com suas grandezas e descrição. A precisão utilizada refere-se nas medidas feitas pelos equipamentos de medição e são representadas pela menor subdivisão possível da escala do equipamento. As propriedades do cobre e da água foram estipuladas de um valor médio de 300 K. (INCROPERA *et al*, 2017).

Tabela 5 – Lista das variáveis medidas/teóricas

Variável	Valor	Grandeza	Descrição
Absorvedor de cobre, propriedades médias em 300 K			
W	0,517	m	Distância média entre tubos
$D_i$	5,000	mm	Diâmetro interno
$D_o$	6,450	mm	Diâmetro externo
$L_{\text{tubo}}$	10,54	m	Comprimento do tubo
$A_{\text{abs}}$	0,605	$\text{m}^2$	Área do absorvedor
$k_{\text{cobre}}$	401,0	W/m.K	Condutividade térmica do cobre
$C_{p_{\text{cobre}}}$	385,0	J/kgK	Calor específico do cobre
N	10	-	N.º de segmentos da serpentina de cobre
$\delta_{\text{chapa}}$	0,450	mm	Espessura da chapa de cobre
$s\delta_{\text{tubo}}$	0,725	mm	Espessura do tubo de cobre
$k_{\text{solda}}$	63,90	W/m.K	Condutividade térmica da solda entre tubo e chapa
Isolamento do absorvedor			
$\delta_{\text{lã de vidro}}$	0,040	m	Espessura do isolamento de lã de vidro
$k_{\text{lã de vidro}}$	0,635	W/m.K	Condutividade térmica do isolamento de lã vidro
Água como fluido de trabalho, propriedades médias em 300 K			
$C_p$	4179	J/kgK	Calor específico
$\rho$	997,0089731	$\text{kg/m}^3$	Massa específica
$\mu$	0,000855000	$\text{Ns/m}^2$	Viscosidade
Pr	5,830	-	Número de Prandtl

Continuação			
Variável	Valor	Grandeza	Precisão
k	0,613	W/mK	Condutividade térmica
$\dot{m}$	0,014456630	kg/s	Vazão mássica em regime permanente
Outras medidas			
$\varepsilon_g$	0,91	-	Emissividade do vidro

Para o sistema de captura de dados, foi utilizado um multímetro com multiplexador Agilent, composto por entradas e saídas as quais foram organizadas conforme a Tab. 6, através da utilização de um *software* de aquisição de dados, BenchLink Data Logger 3. Devido as condições climáticas reinantes durante o período de medição, foi possível a medição nos dias 1 a 3/11/2019, dos quais o primeiro e segundo dia foram parcialmente encobertos e o terceiro dia ocorreu precipitação.

Tabela 6 – Variáveis e configuração do Agilent 34970A no BenchLink Data Logger 3.

Canal	Variável medida
01	$T_{pm}$ (Temperatura do absorvedor, K)
02	$T_a$ (Temperatura ambiente, K)
03	$V_w$ (Velocidade do vento, m/s)
04	$T_{out}$ (Temperatura de saída da água, K)
06	$T_{in}$ (Temperatura de entrada da água, K)
12	$S$ (Irradiância solar global, W/m <sup>2</sup> )

Ressalta-se que devido a utilização de uma planilha de dados, foi necessário estipular um valor médio para o fluido e que maiores precisões poderiam ser obtidas utilizando-se um aplicativo específico de simulação. As hipóteses adotadas para a simulação do comportamento do sistema foram:

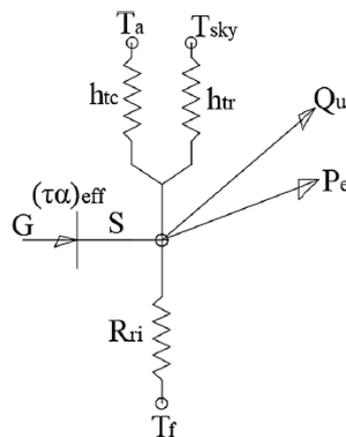
- Vazão mássica fixa em 0,01445 kg/s;
- Temperatura média do fluido em 300 K;
- Número de Reynolds do fluido fixo em 4318 e a Eq. 3.23 foi utilizada para o coeficiente de transferência de calor no fluido na simulação, descrita posteriormente;

- Temperatura inicial do absorvedor de 298,15 K que se refere na Eq. 3.27, da taxa de calor útil recebida pelo absorvedor.

### 3.2 Análise teórica do sistema FV/T

Estudos realizados para modelos FV/T são consideravelmente novos no ramo científico. Sakellariou e Axaopoulos (2018), estruturam o diagrama de resistências térmicas apresentado na Fig. 14. Mostra-se o modelo proposto por meio de três resistências. Detalhadamente, a parte superior é composta pelos coeficientes de perdas térmicas pela convecção do vento ( $h_{tc}$ ) para o ambiente ( $T_a$ ) e pela radiação infravermelha ( $h_{tr}$ ) para o céu ( $T_{sky}$ ). A parte inferior contabiliza apenas o coeficiente da perda térmica devido à condução de calor ( $R_{ri}$ ), unindo o isolamento do sistema FV até o fluido térmico ( $T_f$ ).

Figura 14 - Diagrama equivalente de um sistema FV/T.



Fonte: Adaptado de Sakellariou e Axaopoulos (2018)

Sakellariou e Axaopoulos (2018), afirmam que, mesmo que os sistemas FV/T sejam feitos para gerar eletricidade e energia térmica simultaneamente, o efeito fotovoltaico e a conversão térmica ocorrem sob diferentes espectros da radiação do Sol.

Axaopoulos (2011) *apud* Sakellariou e Axaopoulos (2018) dizem que o comprimento de onda para a conversão térmica fica entre 0,38 a 2,5  $\mu\text{m}$ . Além disso, a absorvidade e a transmissividade para cada material são correlacionados com o comprimento de onda da radiação. Adicionalmente, a distribuição do espectro da radiação solar é diferente para cada massa de ar, AM. Adicionalmente, outra suposição é que a radiação absorvida tem potencial de contribuir com eletricidade e energia térmica sem qualquer preferência de comprimento de onda.

Sakellariou e Axaopoulos (2018), apontam que se utiliza o modelo de HOTTEL e WHILLIER (1955) para a determinação do balanço de energia de um coletor. São necessárias algumas suposições na determinação do modelo, conforme:

- A temperatura do absorvedor do sistema FV/T é uniforme em toda sua massa;
- O absorvedor é composto de células FV, isolamento de lã de vidro, camada superior de EVA e uma organização de aletas e tubos quanto à troca térmica. A camada superior de vidro é desprezada;
- A diferença de temperatura entre as células FV e a superfície do vidro da camada superior é desprezada;
- O coeficiente global de perda térmica  $U_L$  não é considerado constante e são relacionados às variáveis:  $T_a$ ,  $T_{sky}$ ,  $V_w$  e  $T_{pm}$ ;
- As perdas térmicas pelas laterais são desprezadas. O trocador de calor aleta e tubo e as células FV não estão em contato com as laterais;
- A vazão nos tubos é distribuída uniformemente e o escoamento é assumido como regime permanente e completamente desenvolvido;
- O tubo distribuidor de entrada e o tubo coletor de saída são excluídos da análise do comportamento do coletor FV/T;
- A condutância térmica efetiva do absorvedor,  $\lambda_{eff}$ , é a média das diversas camadas (célula FV, EVA, camada posterior e a camada aletada de alumínio);
- A temperatura ambiente é uniforme ao redor do coletor FV/T;
- A transferência de energia térmica do coletor é considerada unidimensional, apenas da direção do escoamento dos tubos verticais;
- As perdas de calor por convecção em função da velocidade do vento são consideradas apenas no topo do coletor e cálculos de convecção natural são desprezados;
- O céu é considerado um corpo negro com temperatura uniforme, enquanto que as perdas por radiação pelo lado traseiro são desprezadas;
- A transmissividade e a absorvidade do FV/T não são consideradas como função do comprimento de onda da radiação. Entretanto, são utilizados valores médios;
- As perdas de carga do fluido são excluídas do balanço de energia do coletor.

A Tab. 7 apresenta as equações utilizadas para a obtenção da potência térmica absorvida pelo sistema térmico. No sistema FV, assume-se que a eficiência do fabricante é a

eficiência de conversão elétrica. Vale notar que das Eq. 3.8 a 3.16 foi feita uma alteração no modelo de Sakellariou e Axaopoulos (2018), pois foi realizada a montagem de um sistema de serpentina e não do sistema de flauta de um coletor de placa plana convencional, onde se tem o tubo que ramifica o fluido na entrada do coletor e há a união destes na saída.

Tabela 7 – Descrição das equações utilizadas no modelo teórico simulado.

Número	Equação	Descrição
3.1	$Q_u = Q_{u_{ss}} - Q_{abs}$	Taxa de calor útil recebida pelo fluido de trabalho, [W]
3.2	$U_L = h_{tc} + h_{tr} + \left(\frac{k}{\delta}\right)_{EVA} + \left(\frac{k}{\delta}\right)_{Tedlar}$	Coeficiente global de perda de calor, W/m <sup>2</sup> K
3.3	$h_{tr} = \varepsilon_g \sigma (T_{pm}^2 + T_{sky}^2) (T_{pm} + T_{sky})$	Coeficiente de transferência de calor por radiação na camada superior transmitida, W/m <sup>2</sup> K
3.4	$T_{sky} = 0,0552 T_a^{1,5}$	Temperatura do céu efetiva, K
3.5	$h_{tc} = 2,2 V_w + 8,3$	Coeficiente de transferência pelo efeito do vento, W/m <sup>2</sup> K
3.6	$Q_{u_{ss}} = F_R [(S(A_{abs} - A_{cell} \eta_e)) - A_{abs} U_L (T_{in} - T_a)]$	Taxa de calor útil em regime permanente, W
3.7	$F_R = F_1 F_3 F_5 \left[ \frac{2F_4}{F_6 \exp\left(-\frac{\sqrt{1-F_2^2}}{F_3}\right) + F_5} - 1 \right]$	Fator de remoção de calor (adaptado de Duffie e Backman (2013)) para serpentina, -
3.8	$F_1 = \frac{\kappa \kappa R (1 + \gamma)^2 - 1 - \gamma - \kappa R}{U_L W [\kappa R (1 + \gamma) - 1]^2 - (\kappa R)^2}$	OBS: Da equação 3.8 a 3.16 são variáveis para a resolução da 3.7.
3.9	$F_2 = \frac{1}{\kappa R (1 + \gamma)^2 - 1 - \gamma - \kappa R}$	
3.10	$F_3 = \frac{\dot{m} C_p}{F_1 U_L A_{abs}}$	
3.11	$F_4 = \left(\frac{1 - F_2^2}{F_2^2}\right)^{1/2}$	
3.12	$F_5 = \frac{1}{F_2} + F_4 - 1$	
3.13	$F_6 = 1 - \frac{1}{F_2} + F_4$	

Continuação		
Número	Equação	Descrição
3.14	$\kappa = \frac{(k\delta U_L)^{1/2}}{\sinh \left[ (W - D_o) \left( \frac{U_L}{k\delta} \right)^{1/2} \right]}$	
3.15	$\gamma = -2 \cosh \left[ (W - D_o) \left( \frac{U_L}{k\delta} \right)^{1/2} \right] - \frac{D_o U_L}{\kappa}$	
3.16	$R = \frac{1}{k_{solda}} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}}$	
3.17	$F' = \frac{1/U_L}{W \left[ \frac{1}{U_L(D_o + (W - D_o)F)} + \frac{1}{h_{ca}} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]}$	Fator de eficiência do coletor, -
3.18	$F = \frac{\tanh \left[ \frac{m(W - D_o)}{2} \right]}{m(W - D_o)/2}$	Eficiência da aleta, -
3.19	$m = \sqrt{\frac{U_L}{(\lambda\delta)_{eff}}}$	
3.20	$h_{fi} = \left( \frac{\left( \frac{f}{8} \right) (Re_m - 1000) Pr_m}{1 + 12,7 \left( \frac{f}{8} \right)^{0,5} \left( Pr_m^{2/3} - 1 \right)} \right) \cdot \frac{\lambda_m}{D_i}$	Coeficiente de transferência de calor no fluido para $3000 < Re < 500.000$ , $W/m^2 K$
3.21	$f = (0,79 \ln(Re_m - 1,64))^{-2}$	Fator de atrito interno no tubo, -
3.22	$Re_m = \frac{4\dot{m}}{\pi D_i \mu_m}$	Número de Reynolds médio, -
3.23	$Q_{abs} = (MCp)_{abs}(T_{pm} - T_{pmo})/t$	Taxa de calor útil absorvida, W

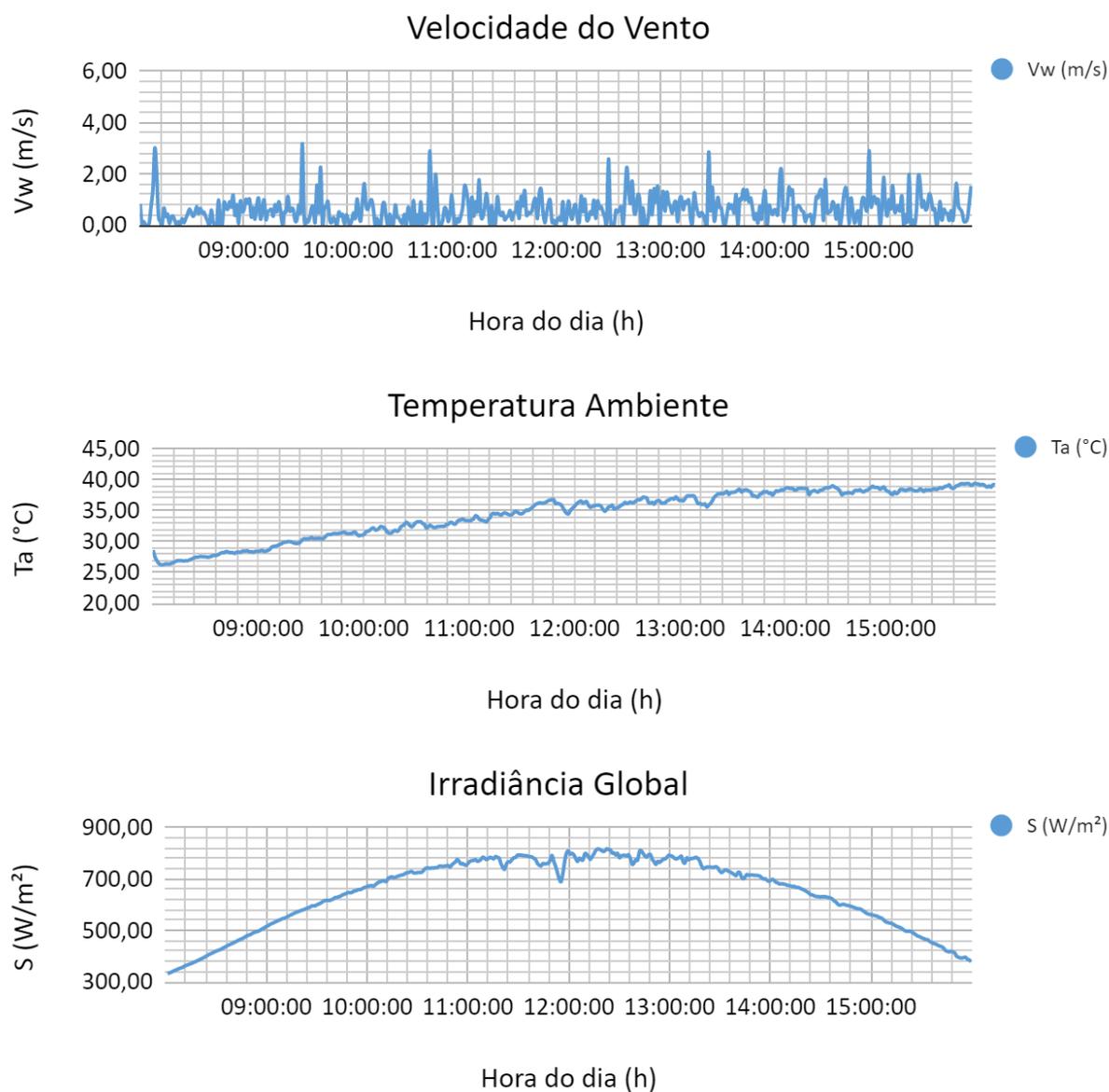
Fonte: Adaptado de Sakellariou e Axaopoulos (2018) e Duffie e Backman (2013)

Para a solução desse conjunto de equações, utilizou-se um *software* de planilha de dados pela agilidade da interação entre os dados obtidos e as respostas necessárias. Dispõe-se de duas equações para o coeficiente de transferência de calor no fluido que é referente ao regime de operação de escoamento, dependentes do número de Reynolds e ambas podem ser utilizadas verificando a condição adequada.

## 4 RESULTADOS

Os resultados comparativos dos dados serão apresentados na ordem dos dias analisados. O sistema foi estudado e dados foram obtidos a cada 5 s de leitura, dos quais o período de análise foi delimitado entre as 8 h e 16 h. Seguem-se os dados das condições do ambiente durante o período de coleta, através das Fig. 15 a 17.

Figura 15 – Dados climáticos do dia 20/11/2019.

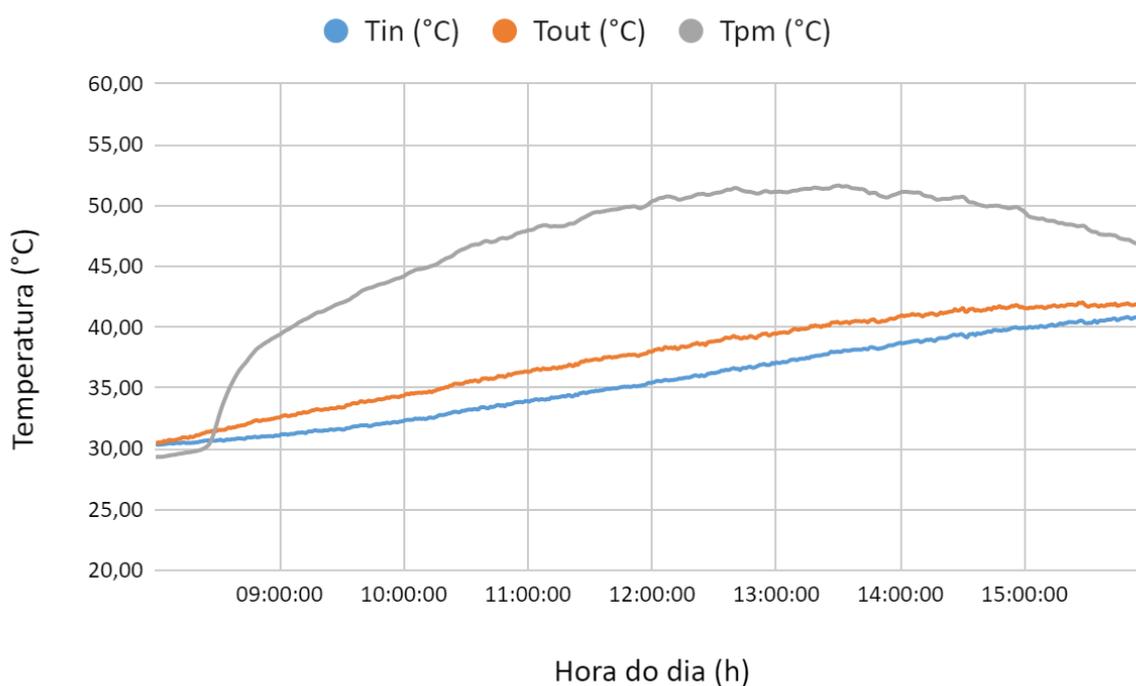


O que se pode visualizar é que durante o período de coleta foi possível operar os equipamentos na condição praticamente ideal (céu limpo e sem nuvens), o que ocasionou pouca variabilidade nos dados simulados e medidos.

Foram constatados os seguintes dados: verificou-se grandes variações para a velocidade do vento em intervalos de tempo pequenos, entretanto, manteve-se entre 0 a 3 m/s. Para a temperatura ambiente, verificou-se um aumento gradativo ao longo do dia, mas se manteve entre 30 a 38 °C na maior parte do tempo analisado. Já para a irradiância global incidente, foi verificado poucas instabilidades entre o período das 11 as 14h, entretanto, foi registrado valores pouco maiores que 800 W/m<sup>2</sup> próximo às 12 h 30 min.

As temperaturas medidas ( $T_{pm}$ ,  $T_{in}$  e  $T_{out}$ ) são mostradas nas Figuras 18 a 20. Foram instalados os sensores de temperatura dentro da tubulação para  $T_{in}$  e  $T_{out}$  e entre o absorvedor e o módulo FV para a medição de  $T_{pm}$ .

Figura 16 – Temperaturas do fluido e absorvedor para o dia 1/11/2019.



Como descrito anteriormente, a  $T_a$  e  $S$  são duas grandezas que impactam no desempenho do sistema. Temperaturas elevadas em que o equipamento é exposto provoca seu aquecimento para a condição de estabilidade térmica entre ambiente/equipamento e os dados de irradiância elevados impactam em maiores diferenças no aquecimento do absorvedor, sendo positivo no processo térmico desejado.

Uma análise de eficiência térmica é necessária para a verificação da viabilidade do sistema proposto. Para a taxa de calor útil simulada foi utilizada a Eq. 3.1 da Tab. 7 e a medida foi realizada pela equação do balanço de energia descrita em Eq. 4.1, onde valores positivos indicam um acréscimo na potência térmica e valores negativos apontam a retirada de calor do fluido devido ao meio exposto estar termicamente inferior comparado ao tanque armazenado que mantém a temperatura do fluido em regime constante.

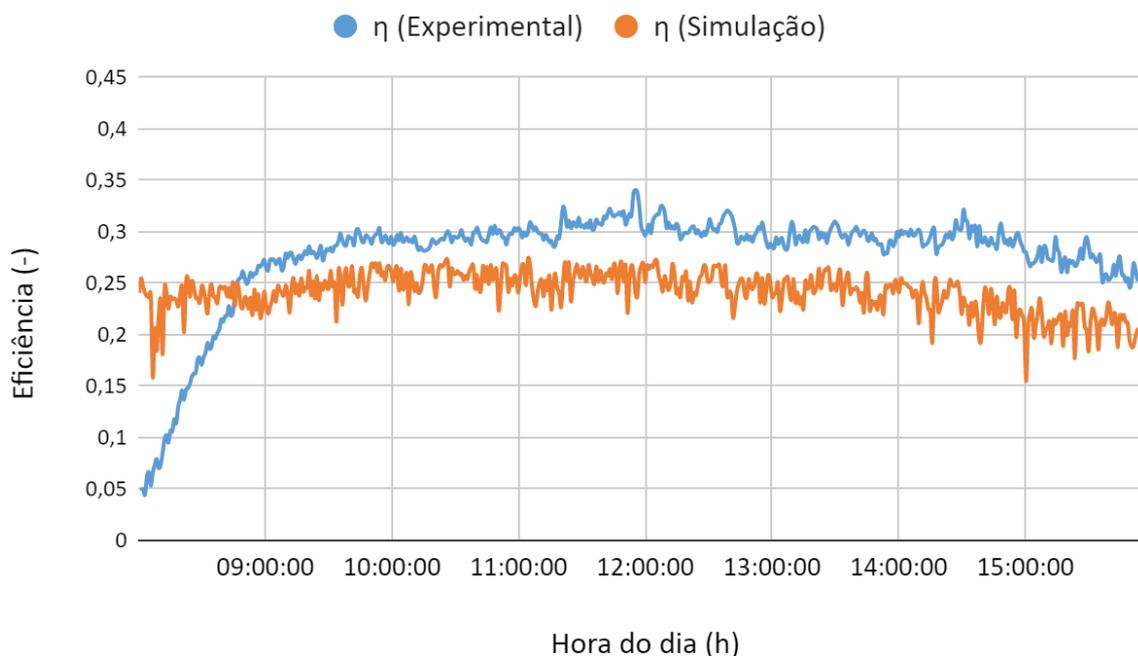
$$Q_u = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (4.1)$$

A eficiência energética térmica se dá pela capacidade de geração de energia útil do sistema através de uma fonte de energia, e expressa-se através da Eq. 4.2.

$$\eta = \frac{Q_u}{SA_{cell}} \quad (4.2)$$

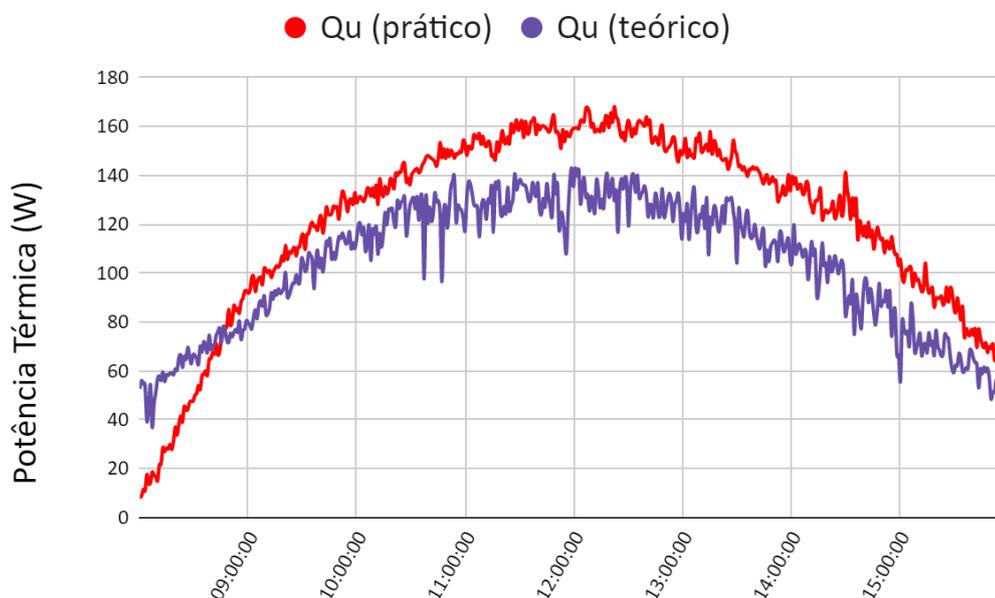
Faz-se a curva de eficiência térmica registrada simulada e experimental na Fig. 17.

Figura 17 – Eficiência energética térmica do sistema



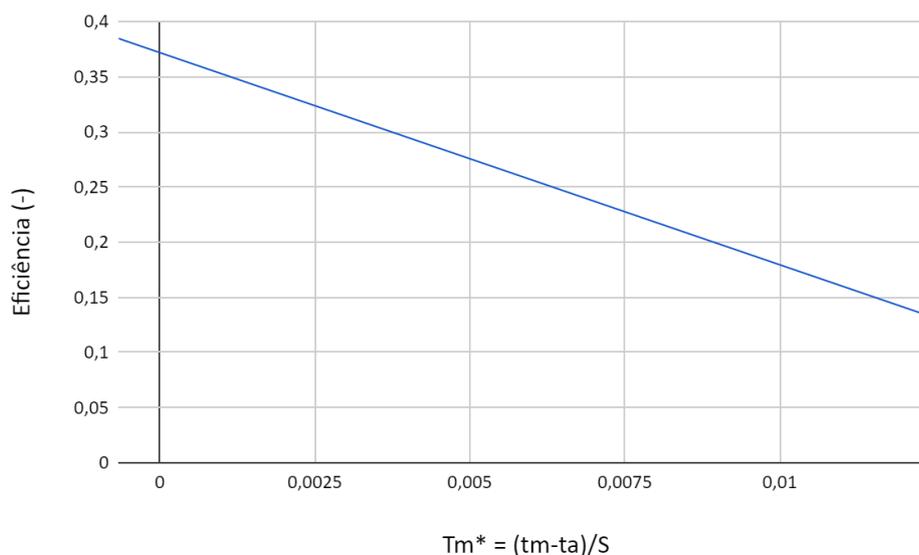
Em outros dados, pode-se verificar a quantidade de energia útil entrando no sistema, registrados a cada 5 s pelo equipamento de medição, através da Fig. 18.

Figura 18 – Energia térmica absorvida pelo sistema



Adicionalmente, pode-se expressar uma curva comumente utilizada para análise de desempenho de coletores térmicos, Fig. 19, representando-se a eficiência térmica em relação às temperaturas, ambiente e do fluido de entrada e saída. Valores menores de eficiência apontam que o sistema está perdendo energia térmica para o ambiente e valores maiores representam a máxima absorção.

Figura 19 – Eficiência térmica x temperatura reduzida



Os resultados mostraram um aumento significativo com a aplicação do sistema térmico, apresentando-se pequenas variabilidade nos dados. A eficiência térmica média do

FV/T simulada para o dia 20/11/2019 foi de 24,43 %, enquanto que o experimental foi de 29,16 %. Os picos de eficiência no sistema medido se dão pela conservação térmica do sistema frente um pico mínimo de irradiância solar global ( $S$ ), ou seja, houve instabilidade da irradiância que seria a energia total disponibilizada para o sistema devido a passagens de nuvens por exemplo. Por isso, quando há uma medição baixa de  $S$ , a variação de temperatura do fluido permanece constante devido à conservação térmica. Em outras palavras, há praticamente a mesma variação de temperatura do fluido ( $T_{out} - T_{in}$ ) para uma irradiação pontual mínima e isso eleva a eficiência medida em níveis distorcidos, chegando a valores máximos de quase 35 % de eficiência, mesmo isso não sendo verdade. Isso ocorre para os outros dias.

Foi verificadas temperaturas ambientes elevadas para o dia analisado, apresentando uma média de 35,46 °C e a variação da temperatura do fluido apresentou uma média de 2,58 °C. Aplicando-se o coeficiente térmico no módulo FV de -0,47 %/°C, é possível uma estimativa devido a não utilização de equipamentos para a ligação e a sua devida captação de dados, apontando valores médios teóricos diários de conversão de eficiência elétrica de 13,43 %.

Os dados indicam a validade da simulação frente aos resultados medidos. Nota-se que o sistema experimental apresentou melhores resultados em um dia com condições climáticas favoráveis (presença de Sol e elevada temperatura ambiente) frente ao simulado.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um módulo híbrido fotovoltaico/térmico (FV/T). Apesar de ser um equipamento comercialmente vendido, ainda é pouco estudado e seu desempenho térmico/elétrico é controverso.

A metodologia aplicada foi dividida entre a simulação do sistema proposto e a análise experimental de um módulo FV/T, construído com materiais comercialmente disponíveis.

Na primeira etapa realizou-se a montagem e calibração de sensores de temperatura, a conformação manual da serpentina do coletor e sua devida soldagem, montagem das tubulações hidráulicas, montagem dos módulos em um suporte e a inserção do sistema térmico em um dos módulos FV. Posteriormente à montagem do sistema, foram realizadas as medições das variáveis que são necessárias para ambos os estudos, simulação e análise experimental, que foram a velocidade do vento, temperatura ambiente, temperatura do absorvedor, temperatura de entrada e da saída do fluido no sistema.

Na segunda etapa foi realizada a simulação do sistema proposto, utilizando-se a metodologia proposta por HOTTEL e WHILLIER (1955) *apud* Sakellariou e Axaopoulos (2018) e adaptado para uma serpentina, de acordo com a metodologia proposta por Duffie e Beckman (2013).

Para o dia 20/11/2019 os valores médios medidos foram de: eficiência energética térmica FV/T simulada de 24,43 % e medida de 29,16 % (Eq. 4.2 para eficiência e Eq. 3.1 e Eq. 4.2 respectivamente para energias térmicas). Valores médios apresentados do dia analisado foram:  $S$  de 681,0 W/m<sup>2</sup>,  $T_{pm}$  de 48,46 °C,  $T_a$  de 35,79 °C e a diferença de temperaturas  $T_{out} - T_{in}$  de 2,58 °C.

As expectativas de utilização de um sistema FV/T são bem promissoras e futuros trabalhos na mesma bancada devem ser realizados para uma possível melhora do sistema, através dos seguintes dados: realização da coleta dos dados em dia de céu limpo, construção do trocador de calor com um equipamento de conformação mecânica do conjunto serpentina e chapa absorvedora e não manualmente, para garantir a planicidade do absorvedor, evitando a presença de bolsas de ar entre absorvedor e a parte traseira do módulo FV, funcionamento adequado do módulo FV sendo que neste trabalho foi apenas considerado o seu coeficiente térmico de potência como influenciante na sua eficiência, e melhor isolamento na parte inferior do sistema FV/T através da utilização de materiais com menor condutividade térmica. Uma outra possível melhora é a utilização de um sistema de resfriamento do fluido antes de retornar para o tanque térmico, para poder linearizar a temperatura de entrada e possivelmente obter maiores eficiências de conversão térmica.

## REFERÊNCIAS

DUFFIE, J.A, BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal process**. 4. ed. Nova Jersey: Wiley, 2013.

ERA SOLAR. **ESPMC Polycrystalline Solar Module**. Disponível em: [http://www.erasolar.com.cn/archiv/Datasheet\\_ESPMC250\\_280.pdf](http://www.erasolar.com.cn/archiv/Datasheet_ESPMC250_280.pdf). Acesso em: 04 mai. 2019.

ERDIL, E.; ILKAN, M.; EGELIOGLU, F. An experimental study on energy generation with a photovoltaic (FV) – solar thermal hybrid system. **International Journal of Energy Research**, n. 33, p. 1241-1245, 2008.

GOETZBERGER, A.; HOFFMAN, V. U. **Photovoltaic Solar Energy Generation**. 1. ed. Freiburg: Springer, 2005.

INCROPERA, F.P., BERGMAN, T.L., DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**, 6ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JÄGER, K.; ISABELLA, O.; SMETS, A. H. M.; SWAAIJ, R. A. C. M. M.; ZEMAN, M. **Solar Energy: Fundamentals, Technology and Systems**. 2014. Delft University of Technology: Holanda.

JI, J.; LU, J. P.; CHOW, T. T.; HE, W.; PEI, G. A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. **Applied Energy**, n. 84, p. 222-237, 2006.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2014.

\_\_\_\_\_. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, n. 30, p. 231-295, 2004.

LUZZI, D. C. **Comparação de desempenho entre coletor híbrido térmico**. 2017. 34 f.. Dissertação (Bacharel em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Faculdade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MIGLIAVACCA, A.; SCARTAZZINI, L. S.; MALLMANN, G. P.; PICININ, M. R. Medindo a radiância e a duração da incidência solar no Instituto Federal de Santa Catarina IFSC/Campus Chapecó. In: SEMINÁRIO DE PESQUISA, EXTENÇÃO E INOVAÇÃO. 2014. Santa Catarina: Chapecó.

Painel / Placa / Célula Solar 100 watts - 18 volts - 100W - Monocristalina - LMS-PSMONO-100W. **Lenharo Mega Store**. Disponível em: <https://www.lenharomegastore.com.br/painel-placa-celula-solar-fotovoltaico-100-watts-18-volts-monocristalina-18-eficiencia.html>. Acesso em: 05 nov. 2019.

PEREIRA, E.B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L. de; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed, São Paulo: São José dos Campos: 2017. *E-book*.

Disponível em:

[http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas\\_Brasileiro\\_Energia\\_Solar\\_2a\\_Edicao.pdf](http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf).

Acesso em: 14 mai. 2019.

FVEDUCATION. **IV curve**. Disponível em: <https://www.FVeducation.org/FVcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>. Acesso em: 04 mai. 2019.

REIS, M. R. O.; LEITE, A. A. F.; BARBOSA, T. N., Modelo teórico de um coletor solar de placa plana mesclando materiais virgens com materiais reciclados (CSSR). *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 31., 2011, Belo Horizonte.

SAKELLARIOU, E.; AXAOPOULOS, P. An experimentally validated, transient model for sheet and tube FVT collector. **Solar Energy**. n. 174, p. 709-718, 2018.

SUBCOBERTURA SOLARMAXXI 4+. **Brasilit**. Disponível em: <https://www.brasilit.com.br/produtos/subcobertura-solarmaxxi-4>. Acesso em: 05 nov. 2019.

TYAGI, V. V.; KAUSHIK, S. C.; TYAGI, S. K. Advancement in solar photovoltaic/thermal (FV/T) hybrid collector technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, New Delhi, n. 16, p. 1383-1398, Jan. 2012.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

ZONDAG, H. A.; VRIES, D. W.; HELDEN, W. G. J.; ZOLINGEN, R. J. C.;

STEENHOVEN, A. A. The yield of different combined FV-thermal collector designs. **Solar Energy**, Eindhoven, n. 74, p. 253-269, Mar. 2003.

## ANEXO A – NOMENCLATURA

$A_{abs}$	Área do coletor térmico, m <sup>2</sup>
$A_{cell}$	Área das células PV/T, m <sup>2</sup>
$C_{p_m}$	Calor específico médio, J/kg K
$D_i$	Diâmetro interno do tubo, m
$D_o$	Diâmetro externo do tubo, m
$D_{dir}$	Direção do vento, graus
$F$	Eficiência da aleta, -
$F'$	Fator de eficiência do coletor, -
$F_R$	Fator de remoção de calor do coletor, -
$G$	Irradiância global horizontal, W/m <sup>2</sup>
$G_0$	Irradiância extraterrestre, W/m <sup>2</sup>
$G_T$	Irradiância solar no plano do coletor, W/m <sup>2</sup>
$G_d$	Irradiância difusa horizontal, W/m <sup>2</sup>
$G_{dir}$	Irradiância direta horizontal, W/m <sup>2</sup>
$G_i$	Irradiância no plano inclinado, W/m <sup>2</sup>
$G_n$	Irradiância direta normal, W/m <sup>2</sup>
$G_{sc}$	Constante solar, W/m <sup>2</sup>
$h_{ca}$	Coefficiente de condutância da solda entre tubo e aleta, W/m <sup>2</sup> K
$h_{fi}$	Coef. de transferência de calor convectivo médio dentro do tubo, W/ m <sup>2</sup> K
$h_{tc}$	Coef. de transferência de calor convectivo na camada superior, W/ m <sup>2</sup> K
$h_{rc}$	Coef. de transferência de calor por radiação na camada superior, W/ m <sup>2</sup> K
$I_{PV/T}$	Corrente elétrica do PV/T, A
$K_g$	Índice de clareza, -
$K_{\theta}$	Fator de modificação do ângulo de incidência, -
$L$	Espessura da camada, m
$\dot{m}$	Taxa mássica do fluido no coletor térmico, kg/s
$(MCp)_{abs}$	Capacidade de calor sensível do absorvedor, J/K
$n$	Índice de refração, -
$P_e$	Potência elétrica, W
$Q$	Taxa de calor, W
$Q_u$	Taxa de calor útil do coletor térmico, W

$Q_{col}$	Radiação térmica coletada pelo fluido de trabalho, W/m <sup>2</sup>
$Q_{conv}$	Radiação térmica perdida pela convecção pelo ar, W/m <sup>2</sup>
$Q_{rad}$	Radiação térmica perdida pela radiação para o ambiente, W/m <sup>2</sup>
$Q_{refl}$	Radiação térmica refletida, W/m <sup>2</sup>
$Q_{sol}$	Radiação térmica transmitida pelo sol, W/m <sup>2</sup>
$Re$	Número de Reynolds, -
$R_{ri}$	Resistência de calor no lado traseiro, m <sup>2</sup> K/W
$S$	Irradiância absorvida, W/m <sup>2</sup>
$t$	Tempo, s
$T_a$	Temperatura ambiente, K
$T_{in}$	Temperatura inicial do fluido do PV/T, K
$T_{out}$	Temperatura de saída do fluido do PV/T, K
$T_p$	Temperatura da placa absorvedora do PV/T, K
$T_{pm(0)}$	Temperatura média inicial da placa absorvedora, K
$T_{pm}$	Temperatura média da placa absorvedora, K
$T_r$	Temperatura de referência STC do PV/T, K
$T_{sky}$	Temperatura efetiva do céu, K
$U_L$	Coefficiente de transferência global do coletor, W/m <sup>2</sup> K
$V_{PV/T}$	Tensão elétrica do PV/T, V
$V_w$	Velocidade do vento, m/s

### Símbolos Gregos

$\alpha$	Absortância, -
$\alpha_c$	Coefficiente de absorção, m <sup>-1</sup>
$\beta$	Inclinação do módulo PV/T, graus
$\beta_{cell}$	Coefficiente de temperatura de potência PV, K <sup>-1</sup>
$\gamma$	Coefficiente de radiação solar, -
$\delta$	Espessura do absorvedor, m
$\varepsilon$	Emissividade, -
$\eta$	Eficiência, -
$\theta$	Ângulo de inclinação solar, graus
$\theta_z$	Ângulo de zênite solar, graus

$\theta_{i-1}$	Ângulo de refração, graus
$\theta_i$	Ângulo de incidência, graus
$k$	Coefficiente de extinção, -
$\lambda$	Condutividade térmica, W/m K
$\lambda_r$	Comprimento de onda da luz, $\mu\text{m}$
$\mu$	Viscosidade dinâmica, Ns/m <sup>2</sup>
$\rho$	Refletividade, -
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$
$\tau \alpha$	Produto da transmitância e absorvância
$\tau$	Transmitância
$\tau_c$	Constante de tempo, s

