

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

COMPARAÇÃO ENTRE O DESEMPENHO DE UM COLETOR HÍBRIDO TÉRMICO
FOTOVOLTAICO COM O DE UM COLETOR PLANO E UM MÓDULO
FOTOVOLTAICO CONVENCIONAL

por

Crissiane Alves Ancines

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, junho de 2016.

COMPARAÇÃO ENTRE O DESEMPENHO DE UM COLETOR HÍBRIDO TÉRMICO
FOTOVOLTAICO COM O DE UM COLETOR PLANO E UM MÓDULO
FOTOVOLTAICO CONVENCIONAL

por

Crissiane Alves Ancines

Engenheira Mecânica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Aprovada por:

Prof^a. Dr^a. Rejane De César Oliveski: PPG em Eng. Mecânica / UNISINOS

Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin: UERGS

Prof^a. Dr^a. Letícia Jenisch Rodrigues: PROMEC/ UFRGS

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 27 de junho de 2016.

“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva por toda a humanidade.”

Marie Curie

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Arno Krenzinger na orientação deste trabalho, pela disposição, pelo conhecimento me passado.

Aos meus pais que me deram uma boa educação, carinho, amor, pensando na minha melhor formação como pessoa.

Ao Anderson Mann, a quem tive o privilégio de conhecer ao longo dessa etapa. Desde o início sempre me incentivou e me apoiou ao longo de toda essa jornada.

Aos colegas do LABSOL, pelo companheirismo, pelo apoio, pelos momentos divertidos e também pelo conhecimento passado.

Aos meus amigos que também me apoiaram durante essa caminhada com muito companheirismo, carinho e paciência.

Aos demais professores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RESUMO

Os aproveitamentos de energia solar em aplicações térmicas ou para a produção de energia elétrica são cada vez mais importantes, por se tratarem de fontes de energia. Os estudos acerca dessas fontes estão se intensificando, a fim de melhorar seus desempenhos e suas aplicações para as condições atuais de desenvolvimento pelo mundo. Uma dessas tecnologias que utilizam como fonte a energia solar, desenvolvida nos últimos 30 anos, é o coletor híbrido térmico fotovoltaico. Esse coletor converte a energia proveniente da radiação solar em energia térmica e elétrica, simultaneamente, com a superposição de um módulo fotovoltaico a um coletor solar de placa plana, podendo ser promissor no progresso de novas tecnologias. Um coletor híbrido térmico fotovoltaico tem sua eficiência térmica menor que um coletor térmico convencional, decorrente de uma maior perda de calor para o meio, pois, em geral, o coletor não tem proteção contra o vento, como a cobertura transparente em um coletor convencional. A eficiência elétrica desses coletores híbridos é maior quando comparada a um sistema fotovoltaico convencional, pois há um resfriamento devido à passagem do fluido na parte posterior desses módulos. Para uma avaliação dessas eficiências, no presente trabalho, foram instalados três tipos de tecnologias que utilizam a energia solar como fonte, (um módulo fotovoltaico, um coletor híbrido térmico fotovoltaico e um coletor solar de placa plana) a fim de comparar os resultados de seus rendimentos, separadamente, atribuindo as mesmas condições meteorológicas em todos eles. A eficiência térmica máxima do coletor híbrido térmico fotovoltaico teve seu valor 3 vezes menor que o do coletor de placa plana utilizado. Já a eficiência elétrica de cada módulo teve um aumento de 5,5% comparando a diferença de energia elétrica gerada ao longo de um ano. Com esses resultados, pode-se dizer que melhorias na parte térmica do coletor híbrido térmico fotovoltaico poderiam ser feitas, de forma a aumentar seu desempenho térmico sem comprometer o rendimento das suas células fotovoltaicas.

Palavras-chave: energia solar; coletor híbrido térmico fotovoltaico; eficiência térmica; eficiência elétrica.

ABSTRACT

The use of solar energy for thermal application and production of electric energy is becoming more important, because it is a form of clean and renewable energy. The studies of these sources are intensifying to improve the performance of these technologies and their applications for the current conditions of the development around the world. One of these technologies using as a source solar energy, developed in the last 30 years is the photovoltaic thermal hybrid solar collector. This collector simultaneously converts the solar radiation into thermal and electrical energy, with the superposition of a photovoltaic module on a flat plate solar collector, may be promising in the progress of new technologies. That a photovoltaic thermal hybrid solar collector has a lower thermal efficiency than a conventional thermal collector, due a greater loss of heat to the environment, because in general the collector has no protection from the wind, as the transparent cover in a conventional collector. The electrical efficiency of these hybrid collectors is higher compared to a conventional photovoltaic, because their cells are cooled by the water passing in the back of the photovoltaic plate. For an evaluation of efficiencies, it were installed three types of technologies that use solar energy as energy source (a photovoltaic module, a thermal hybrid collector and a flat plate solar collector) to separately compare the results of their performance, exposing them all of the same meteorological conditions. The maximum thermal efficiency of the photovoltaic thermal hybrid solar collector was determined being three times lower value than the flat plate collector one. The electrical efficiency of each module was increased by 5.5 % comparing the difference of the electrical energy generated over a whole year. These results indicate that improvements in the thermal part of the photovoltaic thermal hybrid solar collector could be made, increasing the thermal performance without compromise their solar cells efficiency.

Keywords: solar energy; photovoltaic thermal hybrid solar collector; thermal efficiency; electrical efficiency.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO SOBRE COLETORES SOLARES HÍBRIDOS TÉRMICO FOTVOLTAICO	5
3	MÉTODOS DE ENSAIOS DE COLETORES E MÓDULOS	13
3.1	Ensaio para Coletores Solares de Placa Plana	13
3.1.1	Determinação da constante de tempo de coletores térmicos	16
3.1.2	Determinação da eficiência em regime permanente para ensaio externo.....	17
3.2	Eficiência de módulos fotovoltaicos	19
3.2.1	Temperatura nominal de operação	23
3.3	Incertezas das medições	23
4	MONTAGEM DA BANCADA EXPERIMENTAL	25
4.1	Componentes da parte térmica	26
4.1.1	Especificação dos coletores ensaiados	29
4.2	Componentes da parte fotovoltaica	30
5	RESULTADOS	32
5.1	Ensaio térmico	32
5.1.2	Constante de tempo	32
5.1.3	Ensaio externo de eficiência em regime permanente	33
5.1.4	Incerteza experimental no cálculo de eficiência térmica.....	35
5.2	Ensaio fotovoltaico	37
5.2.1	Curva característica	37
5.2.2	Eficiência elétrica	38
5.2.3	Incerteza experimental no cálculo de eficiência elétrica	44
6	CONCLUSÕES	46
6.1	Propostas futuras	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2014. [Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética, 2015].	2
Figura 1.2	Evolução do Mercado de Aquecimento Solar Brasileiro. [Adaptado de ABRAVA, 2014].	3
Figura 2.1	Desenho esquemático de um módulo híbrido térmico fotovoltaico. [Adaptado de http://panelsolarhibrido.es/].	5
Figura 2.2	Efeito da temperatura de operação sobre a curva I-V de um módulo sob uma irradiância constante de 1.000 W/m ² . [Adaptado de Pinho <i>et al.</i> , 2014].	6
Figura 2.3	Disposição esquemática do sistema híbrido solar de circulação forçada direta. [Adaptado de Garg e Agarwal, 1995].	8
Figura 2.4	Projeto de um coletor PV/T chapa e tubo. [Adaptado de Zondag <i>et al.</i> , 2003].	9
Figura 2.5	Eficiência elétrica dos diversos coletores PV/T chapa e tubo de acordo com o número de coberturas de vidro. [Adaptado de Zondag <i>et al.</i> , 2003].	9
Figura 2.7	Resultado experimental de um dia ensolarado da variação diária de temperatura do tanque de água do sistema PV/T e o sistema coletor solar tradicional, com temperatura ambiente e irradiação. [Adaptado de He <i>et al.</i> , 2011].	11
Figura 2.8	Resultado experimental de um dia ensolarado da variação diária de eficiência elétrica do sistema PV/T e da placa fotovoltaica comum com irradiação. [Adaptado de He <i>et al.</i> , 2011].	12
Figura 3.2	Esquema hidráulico e instrumentação da bancada. [Adaptado de NBR 15747-2, 2009].	18
Figura 3.3	Estrutura típica de um módulo fotovoltaico. [Adaptado de http://www.portalsolar.com.br/].	19
Figura 3.4	Modelo de curva I-V e de curva de potência P-V. [Adaptado de Pinho <i>et al.</i> 2014].	20
Figura 3.5	Definição do fator de forma (<i>FF</i>). [Adaptado de Pinho <i>et al.</i> 2014].	21
Figura 4.1	Imagem da montagem da bancada experimental.	25
Figura 4.2	Ilustração do sistema montado e seus componentes.	26

Figura 4.3	Vista em perspectiva do sistema montado e seus componentes.	27
Figura 4.4	Imagem dos equipamentos utilizados na tubulação do fluxo de água.	28
Figura 4.5	Serpentina que compõe o coletor PV/T.	29
Figura 4.6	Coletor de placa plana utilizado.	29
Figura 4.7	Coletor híbrido térmico fotovoltaico utilizado.	30
Figura 5.1	Temperaturas da água nas seções de entrada e saída do coletor de placa plana durante o ensaio para determinar a constante de tempo.	32
Figura 5.2	Temperaturas da água nas seções de entrada e saída do PV/T plana durante o ensaio para determinar a constante de tempo.	33
Figura 5.3	Temperatura média da água do coletor PV/T e o de placa plana durante o ensaio para determinar a constante de tempo.	35
Figura 5.4	Curvas I-V e P-V do coletor híbrido térmico fotovoltaico.	37
Figura 5.5	Curvas I-V e P-V do módulo fotovoltaico convencional.	38
Figura 5.6	Potência elétrica do PV/T corrigida, potência elétrica do FV e irradiação (G_T) medidas em cada ponto em função do tempo.	39
Figura 5.7	Diferença de temperatura entre os módulos menor que 3°C : $G_{T\text{média}} = 872,3 \text{ W/m}^2$ e $T_{a\text{média}} = 22,3^\circ\text{C}$	40
Figura 5.8	Diferença de temperatura entre os módulos média de $4,5^\circ\text{C}$: $G_{T\text{média}} = 846,85 \text{ W/m}^2$ e $T_{a\text{média}} = 26^\circ\text{C}$	41
Figura 5.9	Diferença de temperatura entre os módulos média de 25°C : $G_{T\text{média}} = 912 \text{ W/m}^2$ e $T_{a\text{média}} = 31,6^\circ\text{C}$	42
Figura 5.1	Reta de aproximação para o cálculo de Kt para o coletor PV/T.	43
Figura 5.11	Valores da energia produzida por hora do coletor PV/T e do módulo fotovoltaico para o 3º dia do mês de janeiro.	43
Figura 5.12	Valores da energia produzida por hora do coletor PV/T e do módulo fotovoltaico para o 12º dia do mês de julho.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Desvios permitidos para os parâmetros medidos durante o período de medidas.	18
Tabela 4.1	Valores das especificações dos módulos utilizados.....	30
Tabela 5.1	Pontos de eficiência medidos do coletor PV/T.....	34
Tabela 5.2	Pontos de eficiência medidos do coletor de placa plana.....	34
Tabela 5.3	Valores de incertezas de cada grandeza medida.....	36
Tabela 5.4	Valores das especificações dos módulos utilizados após teste.....	38
Tabela 5.5	Valores de incertezas de cada grandeza medida.....	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAVA	Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers
DASOL	Departamento Nacional de Energia Solar Térmica
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
PV/T	<i>Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collector</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área de abertura	[m ²]
A	Área do módulo fotovoltaico	[m ²]
C_p	Calor específico	[J/kgK]
e	Carga do elétron	[C]
F'	Fator de remoção de calor modificado	
F_R	Fator de remoção de calor	
FF	Fator de forma	
G_T	Irradiância solar no plano inclinado	[W/m ²]
I	Corrente medida	[A]
I_{MP}	Corrente na máxima potência	[A]
I_{SC}	Corrente de curto-circuito	[A]
k_B	Constante de Boltzmann	[J/K]
K_t	Coefficiente térmico para o módulo fotovoltaico	[°C/W.m ⁻²]
m	Fator de idealidade do diodo	
\dot{m}	Taxa mássica	[kg/s]
$NOCT$	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>	[°C]
N_S	Número de células conectadas em série	
P_{MP}	Ponto de máxima potência	[W]
Q_u	Energia útil	[W]
S	Irradiância solar absorvida pelo coletor	[W/m ²]
T_a	Temperatura ambiente	[°C]
T_C	Temperatura da junção da célula	[°C]
T_e	Temperatura do fluido na entrada do coletor	[°C]
T_m	Temperatura média do fluido no interior do coletor	[°C]
T_{mod}	Temperatura das células do módulo fotovoltaico	[°C]
T_{pm}	Temperatura média do absorvedor	[°C]
T_s	Temperatura do fluido na saída do coletor	[°C]
u	Velocidade do vento no ambiente	[m/s]

U_L	Coeficiente global de transferência de calor	[W/m ² °C]
U_r	Incerteza propagada de uma grandeza	
V_{MP}	Tensão na máxima potência	[V]
V_{OC}	Tensão de circuito aberto	[V]
V_v	Vazão volumétrica	[m ³ /s]
W_A	Incerteza referente ao ajuste da curva experimental da calibração	
W_D	Incerteza do instrumento de medida	
W_G	Incerteza referente à medida de grandeza	
W_S	Incerteza referente à leitura do sistema de aquisição de dados	
η_e	Eficiência térmica do coletor	
η_{el}	Eficiência elétrica	
η_m	Eficiência térmica do coletor solar em função da temperatura média do coletor	
α	Coeficiente de variação da corrente de curto circuito com a temperatura	[°C ⁻¹]
α_a	Absortância do absorvedor do coletor	
β	Coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura	[mV/°C]
γ	Coeficiente de variação da potência máxima (potência de pico) com temperatura	[%/°C]
θ	Ângulo de incidência	[°]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[kg/(m.s)]
ν	Viscosidade cinemática do fluido	[m ² /s]
ρ	Massa específica da água	[kg/m ³]
τ	Transmitância da cobertura do coletor	

1 INTRODUÇÃO

A utilização de energia solar como fonte de energia elétrica e de aquecimento de fluidos garante diversos benefícios ambientais, econômicos e, até mesmo, de manutenção. Com esses benefícios, devido à preocupação com o meio ambiente e com as mudanças climáticas que estão ocorrendo mundialmente, o investimento nesse tipo de energia tende a crescer. A energia solar pode ser aproveitada, entre outros, para iluminação, aquecimento de ambientes, obtenção de água quente e na produção de energia elétrica, reduzindo desta forma o uso das fontes convencionais de energia. Em geral, o aproveitamento da radiação solar implica em estudos de eficiência energética para edificações, gerando o emprego de técnicas específicas de arquitetura e de materiais apropriados nas construções.

O uso da energia solar, internacionalmente, tem grande importância. O aumento da capacidade instalada de aquecedores solares de água e painéis fotovoltaicos deve-se ao grande incentivo de países como Israel, Espanha, Índia, Coreia do Sul, China e Alemanha, locais em que exigiu-se uma aplicação mínima em aquecimento de água, conforme relatado pela Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL, 2008]. Essa exigência varia de 30% a 70%, dependendo do clima, do nível de consumo e da disponibilidade de outras fontes de energia, sendo também, fortemente subsidiado. Nos diversos países, onde há crescimento significativo do uso da energia solar, tanto fabricantes quanto investidores em equipamentos para captação e conversão da energia solar contam com benefícios fiscais e incentivos nas tarifas de energia elétrica.

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética [EPE, 2015], o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a geração hidrelétrica, correspondendo a 65,2% da sua oferta interna. O total dessas fontes renováveis representam 74,6% da oferta interna de eletricidade no Brasil, resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. O setor residencial apresentou crescimento de 5,7%. Já no setor industrial houve uma queda de 2,0% no consumo de eletricidade em relação ao ano de 2014. O setor energético no país cresceu 4,8%. Em 2014, a capacidade total instalada de geração de energia elétrica do Brasil atingiu 133.914 MW, representando um acréscimo de 7.171 MW. Na expansão da capacidade instalada, as centrais hidrelétricas contribuíram com 44,3%, enquanto que, para as centrais térmicas foi de 18,1% da capacidade adicionada. Por fim, as usinas eólicas e solares foram responsáveis pelos 37,6% restantes de aumento da rede nacional.

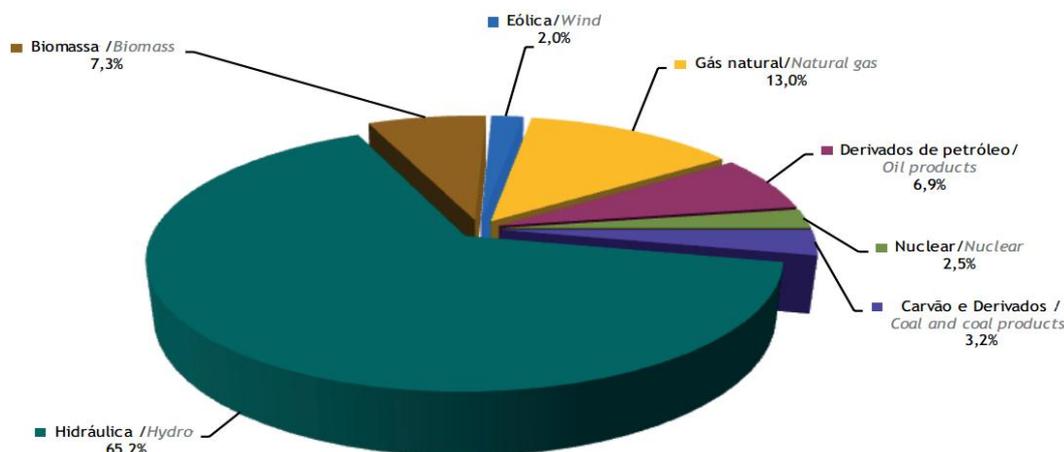


Figura 1.1 - Estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2014. [Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética, 2015].

O investimento em tecnologia solar térmica, apesar de ainda ser pequeno comparado aos outros países onde a radiação é significativamente menor, está aumentando nos últimos anos, conforme a Figura 1.2. Segundo o levantamento feito pela Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento [ABRAVA, 2014], junto às empresas associadas, em 2014, o parque solar térmico brasileiro atingiu a produção de 7.354 GWh a partir de uma área total de 11,24 milhões de metros quadrados de coletores solares instalados no país.

A produção de coletores para aquecimento solar de água também cresceu 4,5%, em relação a 2013, com a instalação de 1,44 milhões de metros quadrados de placas coletoras no ano de 2014. Outro dado interessante é que a área acumulada de coletores instalados até 2014 corresponde à geração de energia suficiente para evitar a emissão anual de 2,3 milhões de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (CO₂). Entre os vários processos de aproveitamento da energia solar, o aquecimento de água é o mais encontrado nas regiões Sul e Sudeste, devido às características climáticas; e a energia fotovoltaica, para geração de eletricidade, nas regiões Norte e Nordeste.

Sabendo que o efeito fotovoltaico é devido à excitação dos elétrons com a incidência da luz solar, a geração de energia elétrica com módulos fotovoltaicos é 100% livre de emissão de poluentes. Entre os diversos materiais utilizados na fabricação das células fotovoltaicos para montagem desses módulos, na conversão da radiação solar em energia elétrica, o mais usual é o silício. Na década de 50, os painéis solares convertiam apenas 4,5% da energia solar em

eletricidade, o que correspondia a 13 Wp/m², a um custo de US\$ 1.785/Wp. Atualmente, a eficiência média mundial triplicou para 15% (143 Wp/m²), a um custo 1.370 vezes mais barato, de US\$ 1,30/Wp [MME, 2014].

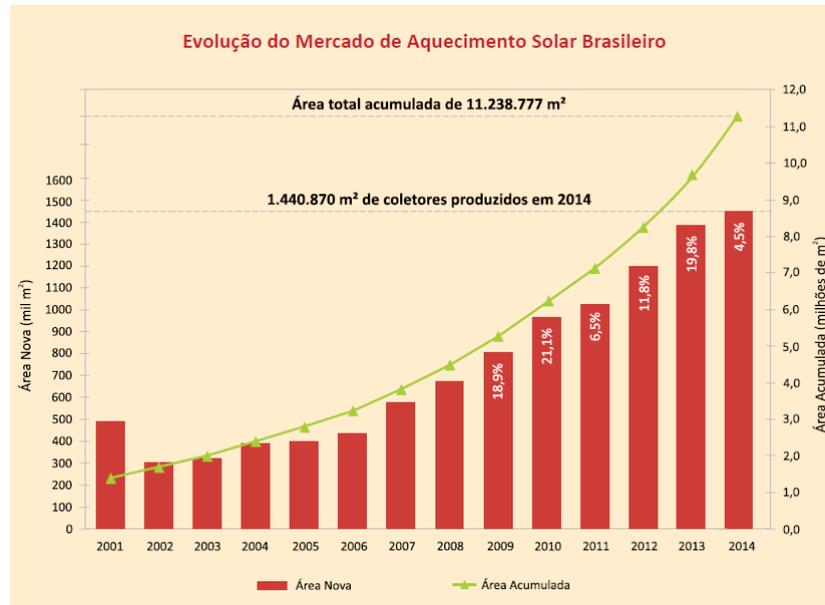


Figura 1.2 - Evolução do Mercado de Aquecimento Solar Brasileiro. [Adaptado de ABRAVA, 2014].

Contudo, o espaço para a instalação de módulos ou coletores solares está cada vez mais restrito nas grandes metrópoles. As edificações estão tomando cada vez mais espaço das áreas urbanas, sendo que nessas áreas a concentração de uso de energia elétrica ou de aquecimento é maior. Uma das restrições técnicas para a utilização de projetos de aproveitamento de energia solar é a baixa eficiência dos sistemas de conversão de energia, necessitando do uso de grandes áreas para a captação em quantidade suficiente para que o empreendimento se torne economicamente viável [de Vries, 1998].

Uma das tecnologias que podem ser empregadas para solucionar esse problema são os coletores híbridos térmicos fotovoltaicos. Este tipo de coletor gera uma maior quantidade de energia elétrica e térmica por metro quadrado do que a de uma instalação separada (térmico e fotovoltaico). Sua instalação é particularmente útil em situações em que a área de telhado é reduzida e, do ponto de vista estético, o coletor híbrido proporciona uma solução mais harmoniosa, em contraste com a combinação de um coletor térmico e um módulo fotovoltaico. Outro fator importante e vantajoso no uso desses coletores híbridos térmico fotovoltaicos é que obtendo uma redução da sua temperatura, conseqüentemente, haverá o

aumento da eficiência elétrica preservando a integridade física das suas células fotovoltaicas [Koech *et al.*, 2012].

Beneficiado pela política do governo e consciência pública, o mercado atual, tanto para energia solar térmica e fotovoltaica está crescendo rapidamente. Os coletores PV/T têm o potencial para experimentar um crescimento similar e, no futuro, a sua comercialização no mercado pode ser ainda maior do que para coletores solares térmicos. Por enquanto, os principais obstáculos para a comercialização de coletores híbridos térmico-fotovoltaicos são a falta de viabilidade econômica, a consciência pública, a padronização do produto, garantias e certificação de desempenho, treinamento de instalação e experiências. Com isso, torna-se necessário mais trabalho de pesquisa e desenvolvimento em novos produtos, procedimentos de teste reconhecidos e normas, projetos de demonstração, bem como um bom monitoramento [Chow, 2010].

O principal objetivo do trabalho é realizar um estudo comparativo do desempenho de um coletor híbrido térmico fotovoltaico em comparação com o de outros dois equipamentos distintos: um módulo fotovoltaico convencional e um coletor solar de aquecimento de água. Esta comparação será feita simultaneamente e em condições controladas para demonstrar com segurança as vantagens e desvantagens de cada equipamento. Assim, para atingir este objetivo principal, várias etapas foram delineadas, constituindo-se dos seguintes objetivos específicos:

- 1) Montar uma bancada comparativa com três tecnologias distintas que utilizam energia solar - um coletor solar de placa plana convencional, um módulo fotovoltaico convencional e um módulo fotovoltaico híbrido;
- 2) Montar um sistema de aquisição de dados para medir as grandezas importantes em cada equipamento;
- 3) Realizar ensaios dessas tecnologias simultaneamente e em diferentes condições para avaliar e comparar o desempenho dos equipamentos.

2 REVISÃO SOBRE COLETORES SOLARES HÍBRIDOS 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 eletricidade e calor. A tecnologia desses coletores se baseia em um sistema térmico vinculado a um módulo fotovoltaico, composto também por uma placa absorvente com os tubos, uma cobertura de vidro e um isolamento, como demonstrado na Figura 2.1.

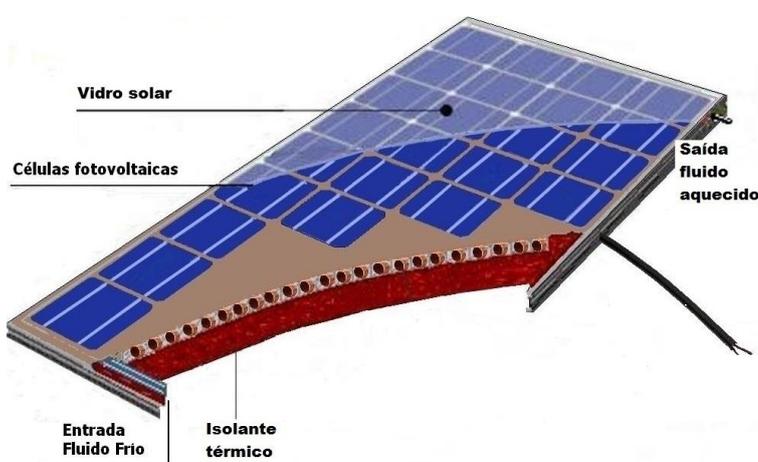


Figura 2.1 - Desenho esquemático de um módulo híbrido térmico fotovoltaico.

[Adaptado de <http://panelsolarhibrido.es/>].

Algumas das vantagens referentes ao uso de coletores híbridos térmicos fotovoltaicos são que eles produzem mais energia do que a combinação de coletores solares térmicos e de sistema fotovoltaico em uma mesma área. Essa solução é viável quando o espaço de instalação é limitado, o que se torna cada vez mais importante, com a restrição de área em construções. Os coletores PV/T proporcionam uma uniformidade na arquitetura de um telhado e, devido ao fato de apenas um tipo de sistema ser instalado em vez de dois, uma redução de custos de instalação é possível [Zondag *et al.*, 2003].

A variação da incidência de radiação solar e da temperatura ambiente acarreta também a variação da temperatura das células que constituem os módulos fotovoltaicos. Essa variação da temperatura de operação desempenha um papel significativo no processo de conversão fotovoltaica. Tanto a eficiência elétrica quanto a potência de saída de um módulo fotovoltaico dependem linearmente da temperatura de funcionamento. Em uma célula solar, o parâmetro mais afetado pelo aumento da temperatura é a tensão de circuito aberto. A corrente seu valor

em pequena quantidade, mas esse aumento não compensa a perda pela queda de tensão. Esse efeito pode ser claramente visualizado na Figura 2.2.

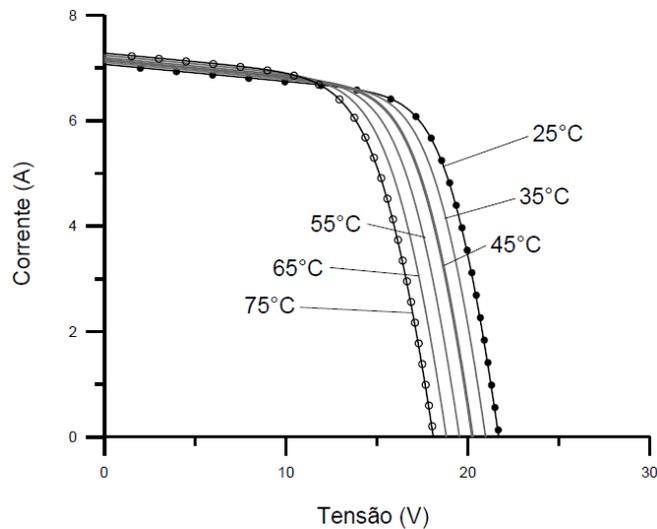


Figura 2.2 - Efeito da temperatura de operação sobre a curva I-V de um módulo sob uma irradiação constante de 1.000 W/m^2 . [Adaptado de Pinho *et al.*, 2014].

Há muitas correlações que expressam a temperatura da célula fotovoltaica em função de variáveis climáticas, como temperatura ambiente, a velocidade do vento local e a irradiação. Outros parâmetros que influenciam a eficiência elétrica são os materiais utilizados no sistema, como: a transmitância de coberturas de vidro, a placa absorvedora, etc. Além disso, essa eficiência elétrica depende fortemente do fluxo de radiação solar sobre o módulo e do tipo de módulo fotovoltaico. Um módulo fotovoltaico comercial pode converter de 6 à 20% da radiação solar incidente em energia elétrica. Parte da radiação é refletida, mas o resto da radiação solar absorvida é convertida em calor, o que aumenta significativamente a temperatura do módulo fotovoltaico e reduz sua eficiência elétrica. Este calor pode ser extraído por água corrente ou ar, movendo-se na parte posterior do módulo, fazendo-se uso de coletores térmicos. Na prática, apenas células de silício amorfo (a-Si) e silício cristalino (c-Si) são encontrados na literatura sobre coletores PV/T. [Dubey *et al.*, 2013].

As pesquisas sobre PV/T começaram em meados dos anos 1970 com o principal objetivo de aumentar a eficiência energética, e com aplicação para o uso doméstico. Wolf, 1976, analisou o desempenho de um sistema fotovoltaico e de aquecimento solar combinado para uma única residência durante um ano inteiro, usando os dados horários de *U.S. Weather Bureau* para insolação e temperatura ambiente na cidade de Boston, em 1963. O sistema

analisado foi de um coletor térmico placa plana, contendo, ao invés de uma superfície de absorção convencional, um painel solar de silício. Nessa análise, utilizaram-se programas detalhados existentes para a computação da carga horária de calor em edifícios, para o desempenho do sistema de aquecimento solar, e para o desempenho do sistema de energia solar fotovoltaica. As propriedades ópticas da matriz fotovoltaica foram utilizadas para a placa de absorção na avaliação do desempenho de coletores térmicos, e a entrada de energia disponível para o absorvedor foi reduzida em 10% levando em conta a energia elétrica retirada, como uma aproximação de primeira ordem. As temperaturas do absorvedor para cada hora, assim obtidas, foram utilizadas no cálculo do desempenho do arranjo fotovoltaico. Essa análise mostrou claramente que a operação combinando aquecimento solar e sistema fotovoltaico é tecnicamente viável, além de rentável. Embora cada parte do sistema opere com desempenho de 10 a 20% inferior ao obtido a partir dos sistemas independentes convencionais, o valor da saída combinada de energia é significativamente maior do que a saída apenas em um único sistema.

Estudos sobre esses coletores híbridos térmico fotovoltaicos abrangem modelos analíticos e numéricos, simulação e trabalho experimental e avaliação qualitativa da produção térmica e elétrica às aplicações de coletores PV/T. Esse tipo de coletor pode ser de placa plana ou concentrador e classificado de acordo com o tipo de fluido de trabalho utilizado: água ou ar [Zondag *et al.*, 2008].

Garg e Agarwal, 1995, desenvolveram um sistema basicamente composto por um aquecedor convencional com circulação forçada, usando água como fluido, com a adição de células solares diretamente sobre a placa absorvedora. Os resultados obtidos foram baseados em simulações para diferentes áreas de células solares, taxas de fluxo de massa e diferentes valores de massa total de água. Esse mesmo sistema foi monitorado por um controlador de temperatura diferencial (*pump-off e pump-on*). Uma vez que o tempo de operação total diminuía, também ocorria uma diminuição de eficiência. Esse sistema foi baseado conforme a Figura 2.3 para uma circulação forçada.

Como as características de absorção das células fotovoltaicas são distintas da placa absorvedora metálica no aquecimento da água, algumas simplificações foram estabelecidas para análise dos dados obtidos. Foi suposto que a parte da energia solar que não é convertida em eletricidade é transferida para a placa de absorção. As propriedades radiantes da placa e das células fotovoltaicas eram as mesmas e a temperatura dessas células era igual à temperatura média da placa. Com isso, a eficiência diária do coletor híbrido térmico fotovoltaico foi obtida em função da energia total térmica mais a energia total elétrica sobre a

irradiância total no coletor. Com a variação destes parâmetros, a eficiência do PV/T foi maior quando houve menor fluxo de massa no coletor. Observou-se também que, com o aumento de área ocupada por células fotovoltaicas, acima do coletor, também aumenta a eficiência elétrica do coletor híbrido. O fator mais importante obtido nesse trabalho foi a influência da temperatura da água que passa pelo coletor, em que quanto maior a temperatura média da placa absorvedora, maior a temperatura da célula fotovoltaica, havendo uma diminuição significativa na sua eficiência elétrica e, conseqüentemente, na redução da eficiência total do coletor térmico fotovoltaico.

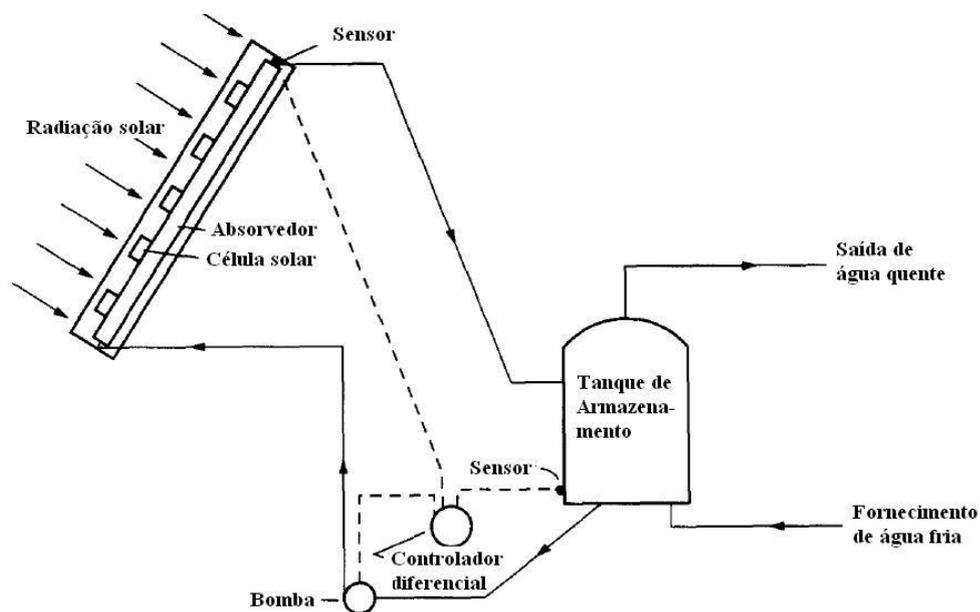


Figura 2.3 - Disposição esquemática do sistema híbrido solar de circulação forçada direta.

[Adaptado de Garg e Agarwal, 1995].

Diversas formas conceituais e de construção de coletores térmicos fotovoltaicos combinados são possíveis. Estes conceitos diferem na sua abordagem para obter o rendimento máximo e não é fácil dizer se o rendimento de um projeto complicado será substancialmente maior do que o rendimento de um mais simples. A fim de obter uma visão mais clara sobre o rendimento esperado de diversos modos de construção de coletores PV/T, Zondag *et al.*, 2003, avaliaram nove tipos de projetos distintos. O projeto do PV/T que teve melhor eficiência e com fácil fabricação foi o coletor de chapa e tubo (*sheet-and-tube PVT-collectors*), composto por uma camada de vidro, ar, uma lâmina fotovoltaica, camada adesiva, um condutor de calor, tubo para o fluxo de água e um isolamento, ilustrado na Figura 2.4.

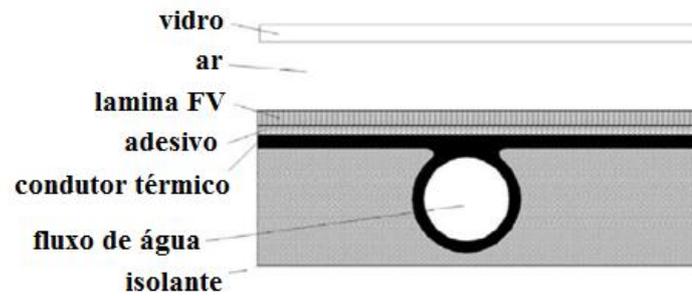


Figura 2.4 - Projeto de um coletor PV/T chapa e tubo. [Adaptado de Zondag *et al.*, 2003].

Na sua análise numérica os autores mostraram que, para um coletor combinado térmico fotovoltaico, a eficiência total, quando a temperatura de entrada for igual a temperatura ambiente, é superior a 50%. Portanto, tem um rendimento mais elevado por unidade de área do que um coletor solar térmico e um módulo fotovoltaico, colocado ao lado do outro sob as mesmas condições. Após essa análise, um protótipo do coletor PV/T, conforme a Figura 2.4, foi construído, onde os resultados do modelo numérico tiveram concordância com os resultados experimentais. No entanto, o desempenho elétrico desse modelo com cobertura de vidro foi um pouco menor comparado à eficiência elétrica de um módulo fotovoltaico convencional, devido às perdas ocorridas pelas coberturas de vidro. Quanto mais camadas de vidro, maiores serão as perdas por reflexão para o meio. O que pode ser melhor visualizado na Figura 2.5.

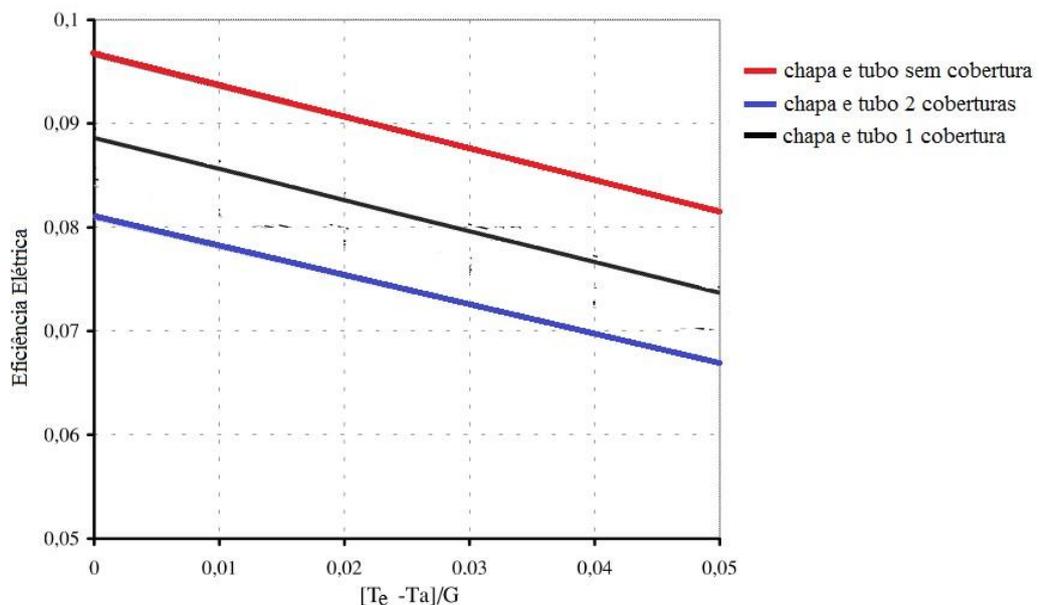


Figura 2.5 - Eficiência elétrica dos diversos coletores PV/T chapa e tubo de acordo com o número de coberturas de vidro. [Adaptado de Zondag *et al.*, 2003].

Mesmo assim, o projeto desse coletor, por ser mais fácil de fabricar, mostrou-se ser o mais promissor dos conceitos examinados para a produção de água quente sanitária. Outra afirmação posta nessa análise foi que, para temperaturas mais baixas de operação, o uso de coletores híbridos sem cobertura pode ser uma boa ideia, já que, nesse caso, as perdas de calor serão menores por causa dos baixos níveis de temperaturas desejadas.

Em um sistema térmico fotovoltaico com coletor de tubos em forma de serpentina, os parâmetros como forma, dimensões e o espaço entre os tubos, afetam significativamente o desempenho da parte térmica e o seu efeito de remoção de calor do tubo. Isto se dá pelo fato de que quanto menor a área de seção do tubo, menor sua eficiência térmica, tendo em vista que a superfície de contato menor reduz a transferência de calor por condução. Com a diminuição do espaçamento dos tubos da serpentina e, conseqüentemente, aumentando a quantidade desses tubos por área do coletor, a eficiência é maior devido ao aumento da transferência de calor para o fluido de trabalho. [Rosli *et al.*, 2015].

Apesar dos valores satisfatórios de eficiências encontradas em inúmeros trabalhos, um coletor de energia solar térmica e fotovoltaica combinado tem eficiência térmica relativamente menor, comparado a um coletor térmico convencional. Isso pode ser visualizado na Figura 2.6.

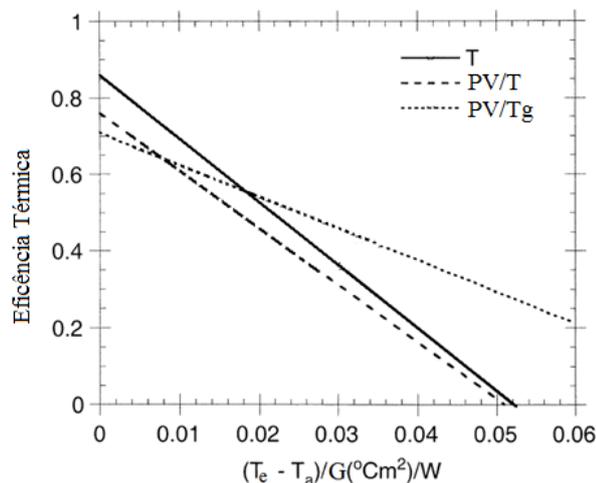


Figura 2.6 - Curva de eficiência térmica de um absorvedor de placa plana convencional (T), um coletor fotovoltaico térmico (PV/T) sem cobertura e um coletor fotovoltaico térmico com uma camada de vidro (PV/Tg). [Adaptado de Sandnes *et al.*, 2002].

Segundo Sandnes *et al.*, 2002, essa menor eficiência térmica é atribuída aos seguintes parâmetros:

- A Energia solar disponível para o sistema térmico é reduzida pela fração de energia incidente convertida em eletricidade pelas células fotovoltaicas;
- A absorvância das células fotovoltaicas ser inferior comparado à absorvância da superfície absorvedora de uma placa plana convencional;
- O aumento da resistência à transferência de calor introduzido na interface das células fotovoltaicas.

Em um trabalho experimental feito por He *et al.*, 2011, comparando o desempenho térmico e elétrico de um PV/T com circulação natural, demonstrou que apesar das duas eficiências (elétrica e térmica) serem menores que os sistemas convencionais instalados separadamente, esses tipos de coletores podem utilizar a energia solar de forma mais eficaz e ter uma maior eficiência total, em comparação com um sistema coletor solar tradicional e um módulo fotovoltaico. Os resultados foram obtidos no decorrer de um dia ensolarado, podendo ser visualizado nas Figuras 2.7 e 2.8. Para melhorar a eficiência total desses coletores, o sistema de PV/T pode reduzir a perda de calor a partir do coletor térmico, quando as células fotovoltaicas atuarem como absorvedores. Uma maior redução da perda de calor pode melhorar o desempenho térmico, mas, ao mesmo tempo, o módulo fotovoltaico irá aumentar de temperatura, afetando o desempenho elétrico do sistema PV/T.

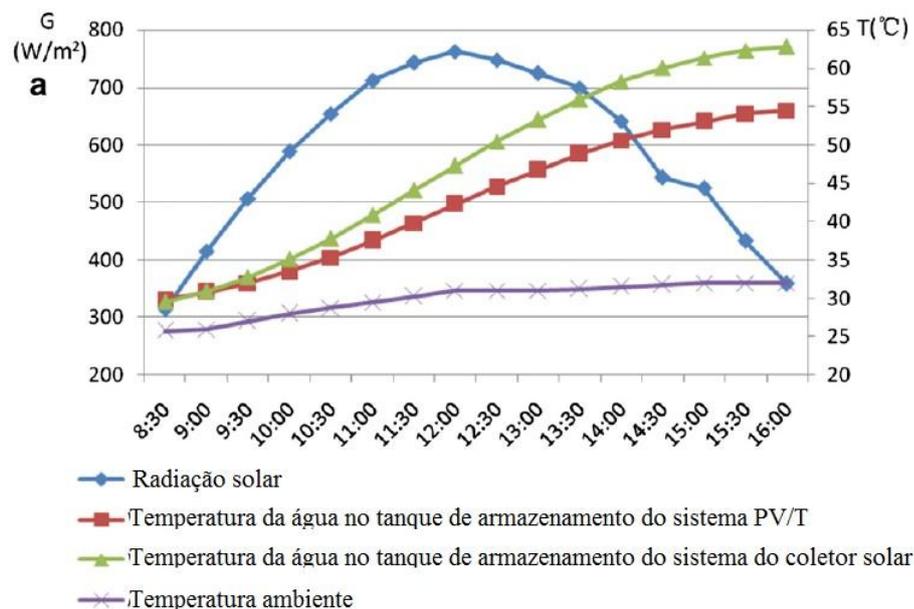


Figura 2.7 - Resultado experimental de um dia ensolarado da variação diária de temperatura do tanque de água do sistema PV/T e o sistema coletor solar tradicional, com temperatura ambiente e irradiação. [Adaptado de He *et al.*, 2011].

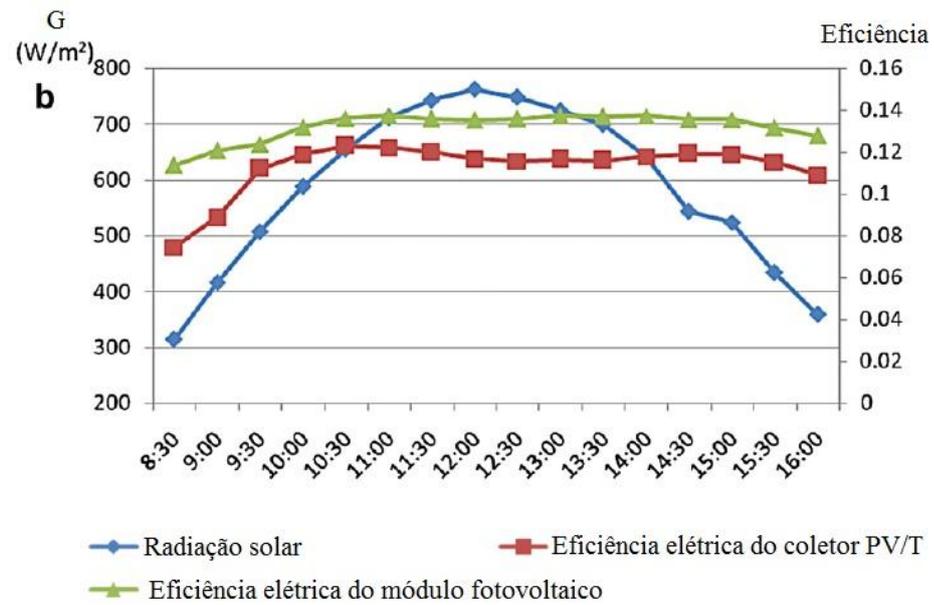


Figura 2.8 - Resultado experimental de um dia ensolarado da variação diária de eficiência elétrica do sistema PV/T e da placa fotovoltaica comum com irradiação. [Adaptado de He *et al.*, 2011].

3 MÉTODOS DE ENSAIOS DE COLETORES E MÓDULOS

3.1 Ensaaios para Coletores Solares de Placa Plana

O propósito dos coletores solares de placa plana é basicamente converter radiação solar em energia térmica. Essa conversão de energia proporciona ao fluido de trabalho (água ou ar) um aquecimento térmico. Esse tipo de coletor solar está esquematizado na Figura 3.1. Esses coletores são normalmente constituídos por:

- Uma caixa retangular, geralmente de alumínio ou polímero, que é um elemento estrutural do coletor;
- Um isolamento térmico normalmente de poliuretano expandido ou lã de vidro, reduzindo as perdas de calor por condução na lateral e no fundo;
- Grade de tubos de cobre que absorvem e transferem a energia térmica para o fluido em seu interior, aquecendo-o;
- Um absorvedor (cobre ou alumínio) pintado de preto fosco, envolvendo a grade de cobre, auxiliando na absorção da radiação;
- Uma ou duas coberturas transparentes à radiação solar, reduzindo as perdas por convecção e radiação para a atmosfera e provocando o efeito estufa no interior do coletor.

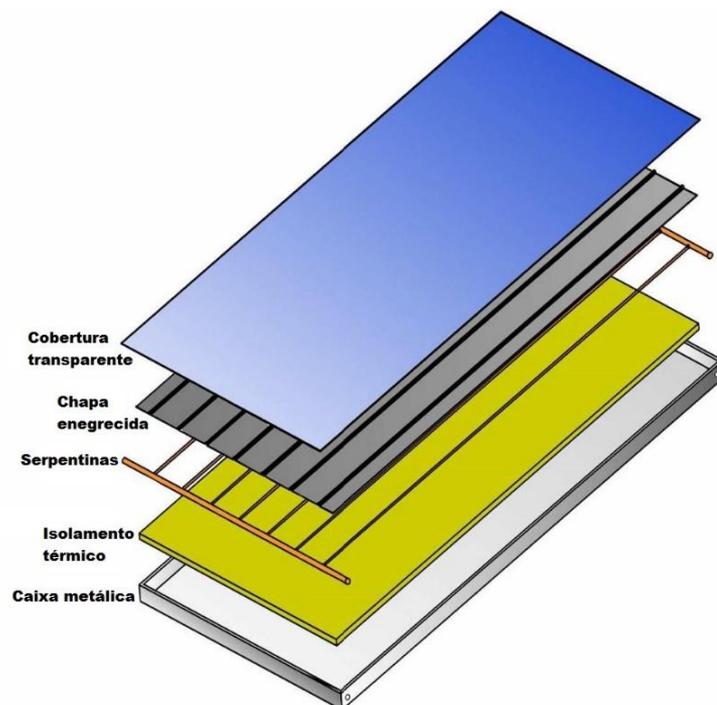


Figura 3.1 - Coletor de placa plana. [Adaptado de <http://www.dasolabrava.org.br>].

Coletores de placa plana podem ser projetados para aplicações que requerem fornecimento de energia a temperaturas moderadas, podendo aquecer a temperaturas de 100° C. Eles são mecanicamente mais simples do que os outros tipos de coletores. Sua principal aplicação é no aquecimento de água para uso doméstico. [Duffie e Beckman, 2013].

O desempenho desses coletores, no estado estacionário, é descrito por um equilíbrio de energia que indica a conversão de energia solar incidente em um ganho de energia térmica útil, as perdas térmicas e as perdas ópticas, indicado na Equação 3.1.

$$Q_u = A_c [S - U_L(T_{pm} - T_a)] \quad (3.1)$$

na qual Q_u é a energia útil, J/s, A_c é a área do coletor, m², S é irradiância solar absorvida pelo coletor, W/m², U_L é o coeficiente global de transferência de calor do coletor, W/m²°C, T_{pm} é a temperatura média do absorvedor, °C e T_a é a temperatura ambiente, °C.

O problema com esta equação é que a temperatura média da placa absorvedora é difícil de medir ou calcular, pois é função do projeto do coletor, da radiação solar incidente e das condições de entrada. Portanto, um fator denominado como fator de remoção de calor (F_R) é definido, matematicamente, como a razão entre a energia útil real extraída pelo coletor e a energia útil que poderia ser retirada, se toda superfície absorvedora estivesse à temperatura de entrada do fluido.

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p(T_s - T_e)}{A_c[S(\tau\alpha_a)_e - U_L(T_e - T_a)]} \quad (3.2)$$

na qual \dot{m} é a taxa mássica do fluido, kg/s, C_p é o calor específico, J/kgK, T_s é a temperatura do fluido na seção de saída do coletor, °C e T_e é a temperatura na seção de entrada, °C.

Em ensaios de coletores, por ser mais usual a medição da vazão volumétrica, a taxa mássica do fluido é calculada a partir do produto entre a vazão e a massa específica da água, conforme a Equação 3.3.

$$\dot{m} = V_V \rho \quad (3.3)$$

na qual V_V é a vazão volumétrica, m³/s, e ρ é a massa específica da água, kg/m³.

Como há uma variação na temperatura da água que flui nos coletores, o calor específico da água (C_p) em função dessa temperatura é dado a partir da relação descrita na Equação 3.4,

conforme a norma brasileira ABNT NBR 15747-2, válida para pressões de 100 kPa e temperaturas entre 0°C e 99,5°C, onde esta é uma média entre as temperaturas de entrada e saída do coletor solar.

$$C_P(T) = Y_0 + Y_1T + Y_2T^2 + Y_3T^3 + Y_4T^4 + Y_5T^5 \quad (3.4)$$

no 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 a temperatura a cada ponto medido em °C.

O fator de remoção de calor (F_R) é a quantidade equivalente à eficácia de um trocador de calor convencional, que é definido como a razão entre a transferência de calor efetiva e a transferência de calor máxima possível. O fator de remoção de calor multiplicado pelo ganho de energia na condição descrita é igual ao ganho útil de energia. Desta forma, para uma radiação solar com incidência normal ao plano do coletor, a energia absorvida por este é dada pela Equação 3.5.

$$Q_u = A_C F_R [S - U_L(T_e - T_a)] \quad (3.5)$$

A radiação solar absorvida pelo coletor (S) é definida como o produto da irradiância solar total no plano do coletor e o produto da transmitância-absortância efetiva, definida pela Equação 3.6.

$$S = G_T(\tau\alpha_a)_e \quad (3.6)$$

na qual G_T é a irradiância solar total no plano do coletor, W/m², τ é a transmitância da cobertura, α_a é a absortância do absorvedor. O produto eficaz transmitância-absortância pode ser aproximado para coletores com vidro comum por $(\tau\alpha_a)_e \cong 1,02(\tau\alpha_a)$.

Portanto, conhecendo a definição da eficiência térmica do coletor como a razão entre a energia utilizada pela energia disponível, ou seja, dividindo a energia útil dada pela Equação 3.5 pela energia solar incidente no plano do coletor, tem-se na Equação 3.7 a eficiência térmica em função da temperatura de entrada.

$$\eta_e = \frac{Q_u}{G_T A_C} = \frac{\dot{m} C_P \Delta T}{G_T A_C} = F_R(\tau\alpha_a)_e - F_R U_L \frac{(T_e - T_a)}{G_T} \quad (3.7)$$

na qual η_e é a eficiência térmica do coletor solar em função da temperatura de entrada do coletor.

Analogamente, a Equação 3.7 pode ser descrita considerando a temperatura do absorvedor igual a média aritmética entre as temperaturas nas seções de entrada e saída do fluido no coletor, mostrado na Equação 3.8.

$$\eta_m = F'(\tau\alpha_a)_e - F'U_L \frac{(T_m - T_a)}{G_T} \quad (3.8)$$

na qual η_m é a eficiência térmica do coletor solar em função de T_m , F' é o fator de eficiência, T_m é a média aritmética das temperaturas do fluido nas seções de entrada e saída do coletor, sendo $T_m = (T_e + T_s)/2$.

Se os valores de eficiência térmica η_m e η_e forem representados graficamente em um plano cartesiano versus $\left(\frac{(T_m - T_a)}{G_T}\right)$ e $\left(\frac{(T_e - T_a)}{G_T}\right)$, respectivamente, resultará, para cada taxa mássica, em uma reta onde o coeficiente linear é dado por $F'(\tau\alpha_a)_e$ e $F_R(\tau\alpha_a)_e$ de acordo com a temperatura utilizada de referência, onde os coeficientes angulares serão, analogamente, $F'U_L$ e $F_R U_L$ [Manea, 2012].

3.1.1 Determinação da constante de tempo de coletores térmicos

A constante de tempo é o intervalo de tempo necessário para que a temperatura de saída do coletor seja 63,2% do acréscimo total na diferença de temperatura de entrada e da temperatura ambiente no instante zero até chegar à condição de regime permanente. As seguintes condições de manutenção do ensaio, descrito na norma ASHRAE 93-2003 [ASHRAE, 2003], são que: a flutuação máxima da temperatura na seção de entrada dos coletores tem que ser de 0,1 °C; a flutuação máxima da taxa mássica de 2 %; a variação máxima do fluxo de radiação solar total sobre o plano do coletor de 50 W/m², todas elas do seu valor médio.

Para a determinação da constante de tempo (T) dos coletores, a norma sugere os seguintes passos:

- 1) Cobrir-se o coletor com uma cobertura refletora, assim bloqueando a radiação solar em seu plano;

- 2) Ajustar a taxa mássica para 0,02 kg/s por metro quadrado da área de abertura;
- 3) Ajustar a temperatura na seção de entrada dos coletores, com a tolerância de 1°C da temperatura ambiente;
- 4) A irradiância solar total não deve ser menor que 790 W/m²;
- 5) Quando a diferença de temperatura da água entre as seções de entrada e saída dos coletores for menor que 0,1 °C é definido o instante t_0 , no qual se retira a cobertura refletora e então é iniciado o ensaio;
- 6) Logo após, aguardar o sistema entrar em regime permanente, que é alcançado quando a temperatura na seção de saída dos coletores varia menos que 0,05 °C por minuto.

3.1.2 Determinação da eficiência em regime permanente para ensaio externo

A norma brasileira NBR 15747-2 [ABNT, 2009] propõe a utilização da área de abertura para determinação da eficiência de um coletor. No período de ensaio, são recomendadas as seguintes condições:

- A irradiância solar global no plano de abertura deve ser maior que 700 W/m²;
- Para coletores planos de cobertura simples, o ângulo de incidência da radiação solar direta na abertura do coletor deve ser menor que 20°;
- A irradiância solar difusa deve ser inferior a 30%, podendo ser desprezada sua influência;
- O valor médio da velocidade do ar ambiente paralelo à abertura do coletor deve ser de (3 ± 1) m/s, assim as perdas por convecção externa se mantêm constante;
- Nos resultados obtidos não devem ser incluídas medidas com diferença de temperatura do fluido menores que 1°C devido a problemas associados de precisão instrumental;
- A taxa mássica deve ser ajustada para 0,02 kg/s por metro quadrado da área de abertura, caso não especificado outra vazão pelo fabricante;

O período de ensaio em regime permanente deve incluir um período de pré-acondicionamento de pelo menos quatro vezes a constante de tempo do coletor, caso essa seja conhecida, ou então, não menos que 15 minutos quando não conhecida, quando a temperatura de entrada do fluido é determinada.

Para o coletor estar operando sob as condições de regime permanente durante um período de medida é considerado que nenhum dos parâmetros experimentais deve diferir dos valores médios sobre o período de medida mais que os limites estabelecidos na Tabela 3.1.

Tabela 3. 1 - Desvios permitidos para os parâmetros medidos durante o período de medidas.

PARÂMETROS	DESVIO PERMITIDO DO VALOR MÉDIO
Irradiância solar global de ensaio	$\pm 50 \text{ W/m}^2$
Temperatura do ar ambiente	$\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$
Vazão mássica do fluido	$\pm 1 \%$
Temperatura do fluido de entrada do coletor	$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$

A norma também determina critérios mínimos na precisão e resolução dos instrumentos de medição como:

- As temperaturas de entrada e de saída do coletor devem ser medidas com uma incerteza inferior a $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ e com resolução mínima de $0,02 \text{ }^\circ\text{C}$;
- A temperatura ambiente deve ser medida com uma incerteza inferior a $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$;
- A diferença de temperatura da água entre as seções de entrada e saída do coletor deve ser medida com um instrumento de precisão melhor que $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$;
- O piranômetro para medida da irradiância solar total deve ser de Classe I, de acordo com a norma ISO 9060 (ISO, 1990);
- A precisão na medida da taxa mássica deve ser de 1%;
- A precisão na medida da velocidade do vento deve ser de $0,5 \text{ m/s}$.

Outra condição sugerida pela norma é o tipo de configuração de ensaio para coletores solares que utilizam líquido, no caso, a água como meio de transferência de calor. O circuito hidráulico foi montado com base na Figura 3.2.

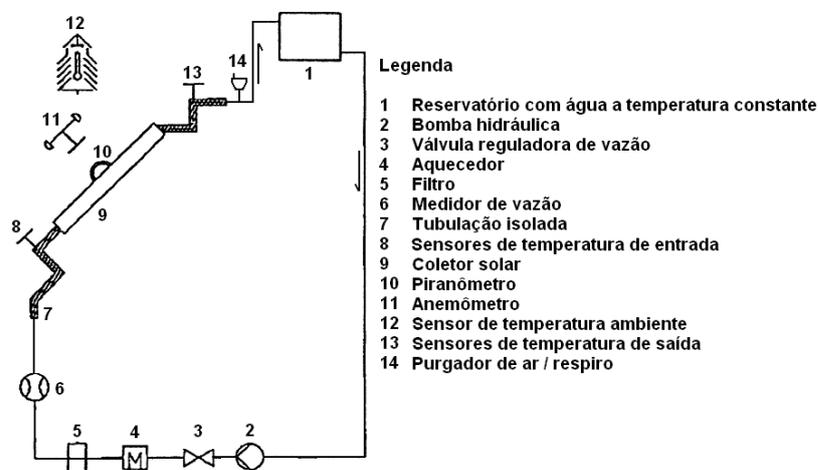


Figura 3.2 - Esquema hidráulico e instrumentação da bancada. [Adaptado de NBR 15747-2, 2009].

3.2 Eficiência de módulos fotovoltaicos

Módulos fotovoltaicos são compostos por células solares que convertem energia solar diretamente em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico, a partir de um material semicondutor, usualmente silício. Uma célula fotovoltaica de silício possui tensão de máxima potência com valores em torno de 0,5V. Para uma maior tensão é necessário que essas células sejam conectadas em série. Nessa conexão usa-se uma fita condutora fina, de modo que todas as células fotovoltaicas do painel solar fotovoltaico sejam ligadas formando um circuito. Essa série de células fotovoltaicas é coberta por uma lâmina de vidro temperado com uma moldura de alumínio. Para aderir essas células ao módulo, usam-se duas lâminas encapsulantes, uma na frente e outra atrás, geralmente feitas com polímero acetato de etil vinila, mais conhecido comercialmente como EVA. Outro polímero é colocado na parte posterior para evitar a entrada de umidade nas células. A montagem típica desses módulos está ilustrada na Figura 3.3.

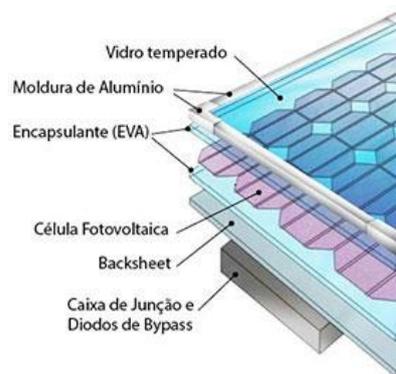


Figura 3.3 - Estrutura típica de um módulo fotovoltaico. [Adaptado de <http://www.portalsolar.com.br/>].

A norma internacional IEC 60904-3, 2008, determina como medir o desempenho elétrico do módulo fotovoltaico nas condições padrão de testes, com valores de irradiância e temperatura das células igual a 1.000W/m^2 e 25°C , respectivamente. Nessas condições encontra-se a curva característica $I-V$. Com os resultados obtidos desta curva é possível obter os principais parâmetros que determinam a qualidade e o desempenho dos módulos fotovoltaicos. A curva característica de um módulo fotovoltaico assemelha-se à que está apresentada na Figura 3.4.

A curva característica I - V descreve o comportamento da corrente em função da tensão em uma célula, módulo ou arranjo fotovoltaico. [Pinho *et al.*, 2014].

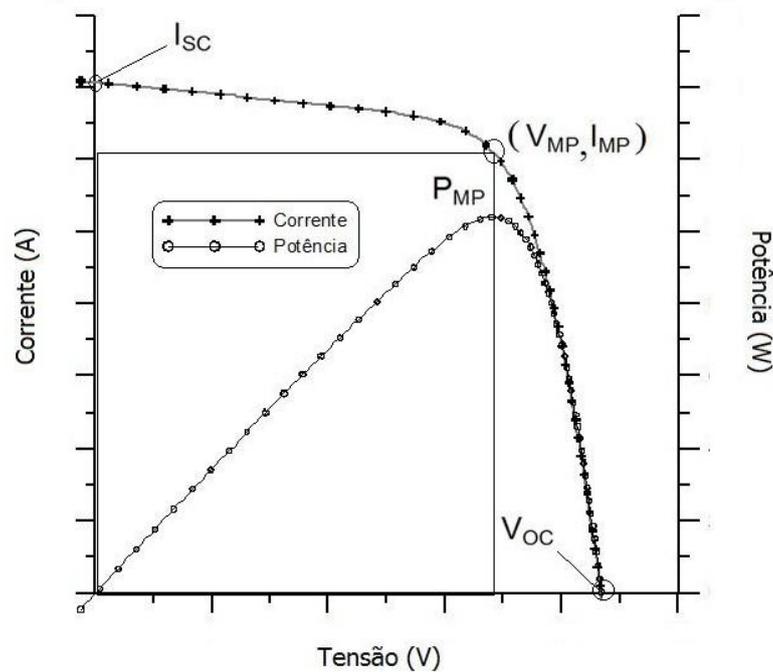


Figura 3.4 - Modelo de curva I - V e de curva de potência P - V . [Adaptado de Pinho *et al.* 2014].

Os parâmetros elétricos obtidos pela curva característica são:

- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): é a máxima tensão que a célula fotovoltaica pode produzir, sendo a tensão medida entre os terminais da célula sem circulação de corrente elétrica.
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): é a máxima corrente obtida e é medida na célula fotovoltaica quando a tensão elétrica em seus terminais é igual à zero. Essa corrente depende da área da célula, da irradiância solar e de sua distribuição espectral, das propriedades ópticas e da probabilidade de coleta dos pares elétrons-lacuna formados;
- Fator de Forma (FF): é a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto-circuito pela tensão de circuito aberto, definido pela Equação 3.9 e é representada na Figura 3.5.

$$FF = \frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (3.9)$$

no qual V_{MP} e I_{MP} é a tensão, V, e a corrente, A, na máxima potência, respectivamente.

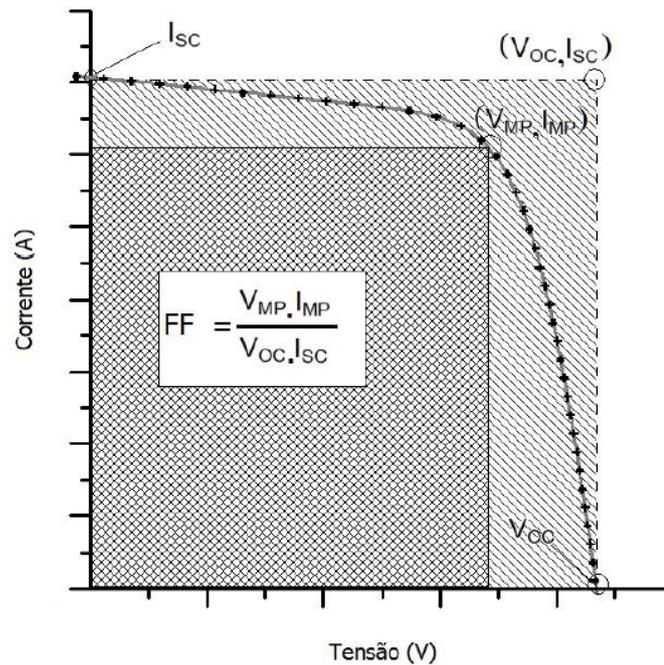


Figura 3.5 - Definição do fator de forma (FF). [Adaptado de Pinho *et al.* 2014].

Com esses parâmetros definidos pela curva característica pode-se encontrar a eficiência elétrica, ou seja, o quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica (η_{el}). Essa eficiência é definida pela Equação 3.10.

$$\eta_{el} = \frac{I_{SC} V_{OC} FF}{A \cdot G_T} \times 100\% = \frac{P_{MP}}{A \cdot G_T} \times 100\% \quad (3.10)$$

na qual A é a área da célula, ou do módulo, m^2 , P_{MP} é a potência máxima, W, e G_T é a irradiância solar incidente, W/m^2 .

A partir dos dados da curva característica pode-se obter a curva da potência em função da tensão. O ponto de máxima potência (P_{MP}) é o ponto no qual a sua derivada em relação à tensão é nula, ou seja, $\left(\frac{dP}{dV} = 0\right)$. Essa curva pode ser visualizada também na Figura 3.4.

A curva característica varia de acordo com a temperatura do módulo e com a irradiância solar que incide sobre ele. Para obter essas curvas I-V nas diferentes condições, R_S , R_P e m são mantidos fixos e os valores de I_{SC} e V_{OC} são corrigidos a partir das Equações 3.11 e 3.12.

$$I_{SC} = I_{SC}^{STC} \frac{G_T}{1000} [1 + \alpha(T_C - 25)] \quad (3.11)$$

$$V_{OC} = V_{OC}^{STC} + N_S \beta (T_C + 25) + \frac{N_S m k_B T_C}{e} \ln \left(\frac{G_T}{1000} \right) \quad (3.12)$$

no qual o índice STC indica o parâmetro na condição padrão (*Standart Test Conditions*), α é o coeficiente de variação de I_{SC} com a temperatura e β é o coeficiente de variação de V_{OC} com a temperatura. Esses coeficientes dependem principalmente do material da célula e tem valores para o silício tipicamente de $\alpha = 0,06\% \text{ C}^{-1}$ e $\beta = -2,3\text{mV}/^\circ\text{C}$.

O coeficiente α é sempre positivo, pois indica o aumento da corrente de curto circuito com o aumento da temperatura. Esse aumento é devido à redução de energia do *gap* do material. Este coeficiente de variação da corrente de curto circuito pode ser expresso pela Equação 3.13 de forma percentual.

$$\alpha = \frac{\partial I_{SC}}{\partial T} \frac{1}{I_{SC}} \quad (3.13)$$

O aumento da temperatura do módulo também causa uma diminuição na tensão de circuito aberto, na ordem de $2\text{mV } ^\circ\text{C}^{-1}$ para cada célula de silício na faixa de 20 a 100°C , devido ao acréscimo na corrente de saturação. A corrente de saturação é uma corrente de portadores de carga minoritários criada por excitação térmica. A redução de V_{OC} com o aumento da temperatura altera toda a curva característica. Esta mudança reduz nitidamente a potência do módulo fotovoltaico [Gasparin, 2009].

O coeficiente de variação da tensão de circuito aberto (β) é negativo, pois a V_{OC} sofre um decréscimo devido ao aumento da corrente de saturação reversa e é expresso pela Equação 3.14.

$$\beta = \frac{\partial V_{OC}}{\partial T} \quad (3.14)$$

Com a queda da potência máxima, é definido o coeficiente de variação da potência de pico (γ), dado pela Equação 3.15. Este coeficiente é negativo e tem valores típicos para módulos de silício em torno de $-0,5$ a $-0,3 \text{ } \%/^\circ\text{C}$.

$$\gamma = \frac{\partial P_{MP}}{\partial T} \quad (3.15)$$

3.2.1 Temperatura nominal de operação

A temperatura nominal de cada módulo fotovoltaico é obtida quando o mesmo é exposto, em circuito aberto, a uma irradiância de 800 W/m², temperatura ambiente de 20 °C e uma velocidade do vento incidindo sobre ele de 1 m/s. Essa temperatura é conhecida geralmente pela sigla NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*). A NOCT tem, normalmente, valores que variam de 40 a 50°C e está relacionada às propriedades ópticas e térmicas dos materiais que compõem os módulos. Quanto menor o valor do NOCT, considerando os coeficientes de temperatura iguais, melhor o desempenho do módulo fotovoltaico, pois as perdas referentes à diferença de temperatura serão menores. O valor da temperatura nominal normalmente é indicado pelo fabricante e, com seu valor conhecido, pode-se encontrar o valor do coeficiente K_t pela Equação 3.16.

$$K_t = \frac{NOCT - 20}{800} \quad (3.16)$$

no qual K_t é o coeficiente térmico para o módulo, °C/Wm⁻², que representa o aumento de temperatura causado pela incidência da radiação solar.

Desta forma é possível estimar a temperatura das células de um módulo fotovoltaico em uma determinada condição de temperatura ambiente e irradiância usando a Equação 3.17.

$$T_{mod} = T_a + K_t G_T \quad (3.17)$$

na qual T_{mod} é a temperatura das células do módulo fotovoltaico, °C, T_a é a temperatura ambiente, °C, G_T é a irradiância incidente sobre o módulo, W/m².

3.3 Incertezas das medições

O cálculo de incerteza associada à medida do instrumento utilizado para os dados experimentais é obtido através da Equação 3.18, que relaciona a leitura do sistema de

aquisição de dados, a incerteza na medida da grandeza e a incerteza no ajuste das curvas experimentais de calibração.

$$W_D = \sqrt{(W_S)^2 + (W_G)^2 + (W_A)^2} \quad (3.18)$$

na qual W_D é a incerteza do instrumento de medida, W_S é a incerteza do instrumento de aquisição de dados, W_G é a incerteza na medida da grandeza e W_A é a incerteza de ajuste da curva de calibração.

Algumas grandezas não são obtidas diretamente em uma medição, mas podem ser determinadas indiretamente a partir de cálculos de uma relação já conhecida, na qual se relacionam com as grandezas medidas diretamente. Para o cálculo da incerteza dessas grandezas é usado o método de propagação de incerteza de medição. Esse método é um procedimento onde se estima a propagação do desvio padrão de uma grandeza Y a partir do desvio padrão de suas variáveis dependentes x_1 até x_n . Pela Equação 3.19 pode-se obter essa incerteza [Holman, 1994].

$$U_r = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial x_1} u_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_n} u_n\right)^2} \quad (3.19)$$

na qual U_r é a incerteza propagada da grandeza Y e u_1 e u_n são as incertezas das grandezas determinadas diretamente.

4 MONTAGEM DA BANCADA EXPERIMENTAL

O Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABSOL- UFRGS) possui uma bancada para ensaios do desempenho de coletores solares. Ela foi desenvolvida por Manea, 2012, e Rosa, 2012, possibilitando ensaios experimentais simultâneos de mais de um coletor térmico, podendo realizar comparações precisas sobre o comportamento de diferentes tipos e tecnologias de coletores, sob as mesmas condições ambientais. A mesma foi projetada de modo que permite um giro de 360°, satisfazendo a norma NBR 15747 [ABNT, 2009] que impõe um ângulo de incidência solar de no máximo 20°, e possibilitando que os testes sejam realizados para vários horários ao longo do dia. Os coletores e módulos foram instalados acima da bancada, com ângulo de inclinação de 45°, com a finalidade de serem testados nas mesmas condições meteorológicas, como mostrado na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Imagem da montagem da bancada experimental.

Para a medição de irradiância global incidente foi usado um piranômetro da marca Delta Ohm, modelo LP PYRA 02, primeira classe conforme ISO 9060 (*Standard & Pyranometer*

Measurement Accuracy), instalado no mesmo plano dos coletores solares, com uma incerteza de 3% FDE ($FDE=1000 \text{ W/m}^2$) [Toro, 2015]. O anemômetro da marca NRG#40C com sensor de três pás de alcance de 1m/s a 96m/s foi utilizado para medir a velocidade do vento. Todos os equipamentos citados foram conectados ao equipamento de aquisição de dados da marca Agilent, modelo 34970A, ligado a um computador para armazenamento dos dados ao longo de todos os períodos de testes.

4.1 Componentes da parte térmica

O coletor híbrido térmico fotovoltaico (2) e o coletor de placa plana (3) estão instalados em série e em circuito fechado. A instalação em série garante uma mesma vazão nos dois coletores e uma economia de instrumentação, usando apenas um medidor de vazão. A água que sai do tanque (6) entra no coletor PV/T. Logo que sai deste, a água passa por um trocador de calor (10) e, após, entra no coletor de placa plana e volta para o tanque. O sistema de aquecimento é ativo, onde há circulação forçada entre o reservatório e o coletor, através de uma bomba hidráulica (7). Os ensaios foram realizados com todos os coletores montados sobre uma estrutura com inclinação de 45° , pois é uma inclinação mais usual na região sul do Brasil. Os componentes utilizados estão esquematicamente ilustrados nas Figuras 4.2 e 4.3.

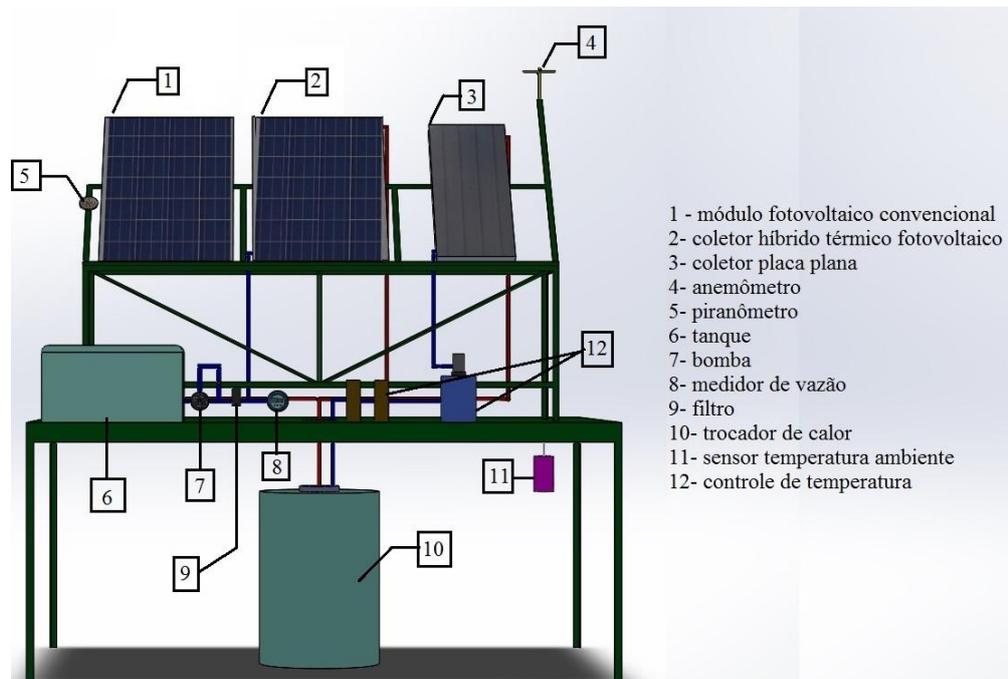


Figura 4.2 - Ilustração do sistema montado e seus componentes.

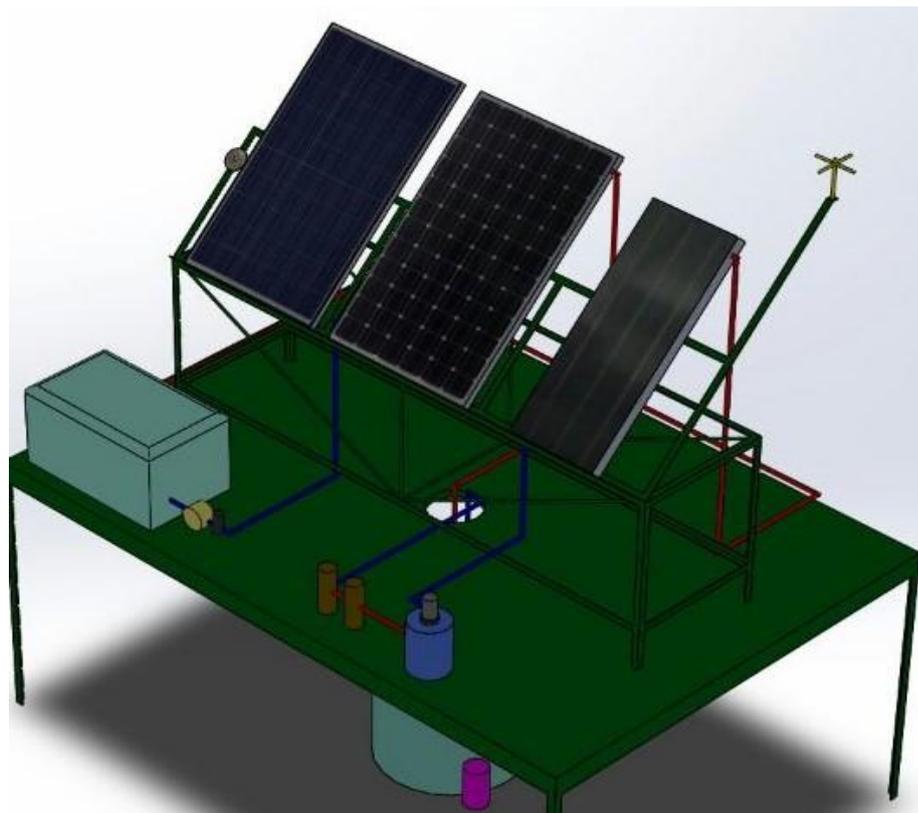


Figura 4.3 - Vista em perspectiva do sistema montado e seus componentes.

Para obter os resultados da parte térmica, sensores de platina tipo Pt100 classe A foram utilizados para medir a temperatura ambiente (11) e as temperaturas absolutas da água nas seções de entrada e saída dos coletores. A utilização e a calibração desses sensores estão descritos em Manea, 2012. A incerteza dessa calibração na medida da diferença de temperatura entre os sensores é igual a $0,04^{\circ}\text{C}$ e a incerteza total associada aos sensores Pt100 para as medidas absolutas é de $0,12^{\circ}\text{C}$. Apesar da calibração ter sido realizada há 4 anos, por se tratar de elementos resistivos, com pouca utilização, sua validade é mantida.

A instalação do circuito hidráulico foi baseada nas recomendações da norma NBR 15747-2 [ABNT, 2009] composta por uma tubulação de Polipropileno (PPR) isolada termicamente com espuma elastomérica para evitar as perdas de calor para o meio externo. A bomba (7) para a circulação de água é da marca Texius, modelo TBHX-BR, com potência nominal de 100 W e vazão máxima de 45 L/min, localizada no ponto mais baixo da tubulação em relação ao reservatório de água para que a própria pressão provocada pela coluna de água empurre o ar da tubulação de sucção para dentro da bomba, facilitando o trabalho da mesma em eliminar o ar através da linha de recalque.

O medidor de vazão (8) é da marca YOKOGAWA, modelo AXF010G, com diâmetro interno do medidor de 10 mm, podendo medir vazões no intervalo máximo entre 0 e 47,123 L/min e no intervalo mínimo entre 0 e 0,472 L/min, dispondo de um sinal de saída de 4 mA a 20 mA associado a esse intervalo de medida. O medidor de vazão foi aferido por Toro, 2015, correspondendo a 0,35% de exatidão do valor da velocidade medida, definindo a equação da reta que caracteriza o medidor pela Equação 4.1 abaixo.

$$V_v(I) = 0,75 I - 3 \quad (4.1)$$

na qual $V_v(I)$ é a vazão volumétrica, L/min, e I é a corrente medida, mA.

Para melhor desempenho da tubulação construída para o fluxo de água, foram instalados alguns purgadores, já que a água aquecida forma vapor, dificultando a passagem do fluido no decorrer da tubulação, sendo necessária sua remoção. Também foi instalado um *by-pass* com válvula de gaveta, permitindo que o fluido percorra apenas um sentido. Esses equipamentos instalados na tubulação estão ilustrados na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Imagem dos equipamentos utilizados na tubulação do fluxo de água.

O filtro (9) foi instalado com o objetivo de diminuir as impurezas da água que passa em toda tubulação de água, pois a tubulação interna do coletor híbrido térmico-fotovoltaico é muito estreita, podendo haver problemas de obstrução no fluxo de água. Essa tubulação interna é composta por um polímero com alta resistência a temperatura e pode ser visualizada na Figura 4.5.

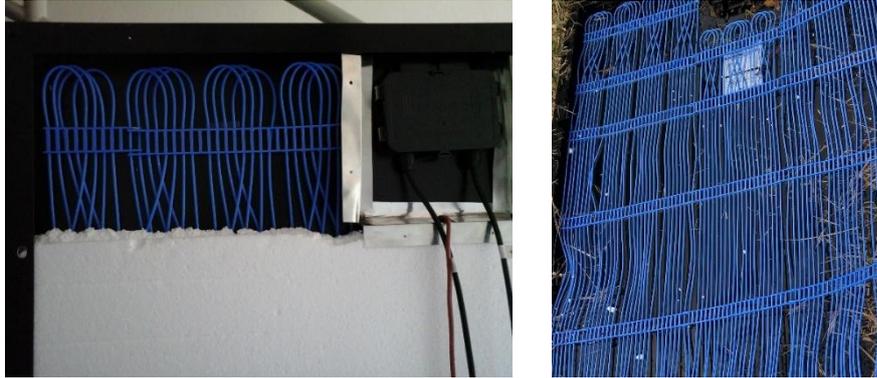


Figura 4.5 - Serpentina que compõe o coletor PV/T.

Por se tratar de um ensaio de comparação de dois coletores solares térmicos distintos, é recomendável que o valor da temperatura de entrada de ambos seja o mesmo. Isso foi possível com a instalação de um trocador de calor (10) entre a saída do coletor híbrido e a entrada do coletor térmico de placa plana, com a função de diminuir a temperatura da água, seguido de uma resistência elétrica e um controlador de temperatura (12) desenvolvido por Santos *et al.*, 2016, e apresentado em mais detalhes em Santos, 2016.

4.1.1 Especificação dos coletores ensaiados

O coletor de placa plana ensaiado possui área de abertura de $0,80 \text{ m}^2$ e área total de $0,90 \text{ m}^2$. O coletor é composto de uma caixa de alumínio, seguido de um isolamento térmico de lã de vidro e, sobre ele, uma grade de tubos de cobre soldada a uma chapa de cobre. E, por fim, isolados por uma cobertura de vidro transparente, conforme a Figura 4.6. Esse coletor estava disponível no LABSOL, já usado por alguns anos.



Figura 4.6 - Coletor de placa plana utilizado.

O coletor híbrido térmico fotovoltaico é comercial e tem sua área de abertura de 1,56 m² e área total de 1,63 m². Ele é composto por uma lâmina de alumínio, um isolante térmico de poliestireno expandido, seguido de uma serpentina de polímero para a passagem do fluido e sobre essa tubulação, um módulo fotovoltaico laminado convencionalmente entre Tedlar[®] e vidro, da marca LG, conforme mostrado na Figura 4.7.



Figura 4.7 - Coletor híbrido térmico fotovoltaico utilizado.

4.2 Componentes da parte fotovoltaica

Para obtenção dos resultados experimentais do sistema fotovoltaico, um módulo fotovoltaico convencional foi instalado junto ao PV/T. As especificações da parte fotovoltaica dos dois módulos estão descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores das especificações dos módulos utilizados.

Especificações do Fabricante	Módulo FV	Módulo PV/T
Potência Máxima [W]	260	260
Tensão Circuito Aberto [V]	37,98	37,30
Tensão Potência Máxima [V]	30,63	30,90
Corrente Curto Circuito [A]	9,04	9,01
Corrente Potência Máxima [A]	8,49	8,41

Nos módulos fotovoltaicos em operação, a polarização correspondente ao ponto de máxima potência está variando continuamente com as condições meteorológicas, portanto decidiu-se utilizar um microinversor conectado a cada módulo como forma de fazer com que ambos estejam operando em seu ponto de potência máxima. Os microinversores utilizados são da marca MicroReplus 250-A. As especificações do inversor são: potência do gerador igual a 250 W, máxima tensão c.c. de 60 V, máxima corrente de curto circuito de entrada de 14 A, fator de potência ($\cos\phi$) maior que 0,99, eficiência de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP) maior que 99,5% e eficiência máxima de 96,3%. Para medir a corrente elétrica que circula nos módulos, foram utilizados resistores *shunt* com 5 m Ω . A tensão foi medida conectando diretamente cabos entre os terminais dos módulos e o sistema de aquisição de dados. A temperatura dos módulos foi medida com um sensor de platina tipo Pt100 classe A, que foi acoplado no módulo fotovoltaico convencional, enquanto um sensor Pt1000 já estava instalado ao coletor híbrido fotovoltaico térmico, da marca Sensorshop24.

5 RESULTADOS

A seguir serão mostrados os resultados obtidos para o desempenho térmico e elétrico de cada tecnologia estudada neste trabalho.

5.1 Ensaio térmico

5.1.1 Constante de tempo

Como descrito na Seção 3.1.1, foram obtidas as curvas de constante de tempo de cada coletor utilizado no teste. Os resultados das Figuras 5.1 e 5.2 mostram a variação da temperatura de saída de cada coletor (respectivamente, da placa plana e PV/T) até chegar em regime permanente, com a temperatura de entrada e vazão constante e variações no valor da irradiância solar menores que 50 W/m^2 .

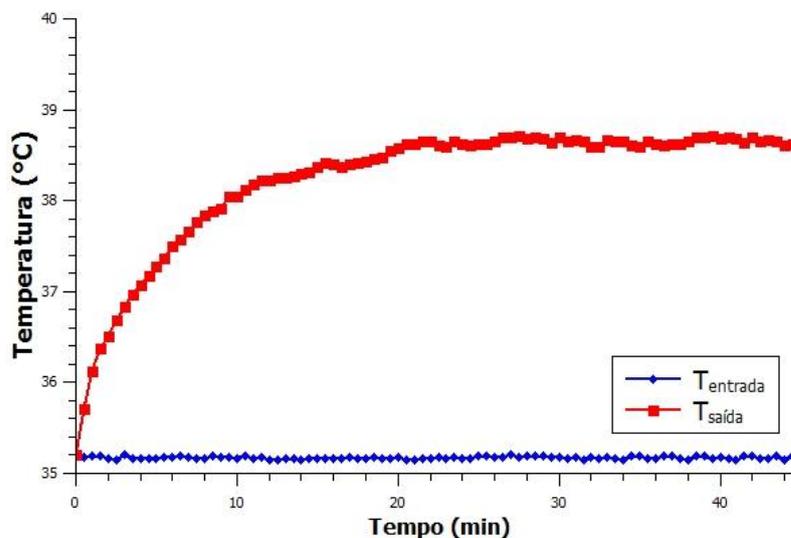


Figura 5.1 - Temperaturas da água nas seções de entrada e saída do coletor de placa plana durante o ensaio para determinar a constante de tempo.

Conforme estas curvas, os valores da constante de tempo foram de 8 minutos e 13 minutos para o coletor de placa plana e o coletor híbrido térmico fotovoltaico, respectivamente. Com esses valores pode-se dizer que ambos estão de acordo com resultados normalmente obtidos em coletores de placa plana. Porém, por ser um período

demasiadamente alto, para esta dissertação foi utilizado o período de 15 minutos para cada ponto, que é o tempo mínimo especificado pela norma.

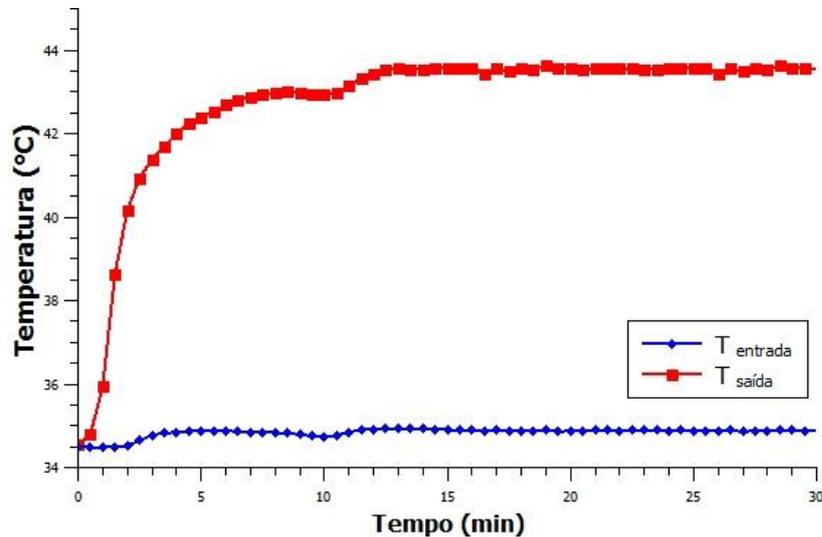


Figura 5.2 - Temperaturas da água nas seções de entrada e saída do PV/T plana durante o ensaio para determinar a constante de tempo.

5.1.2 Ensaio externo de eficiência em regime permanente

Após os ensaios para obter os valores da constante de tempo, 18 pontos foram medidos. Com esses pontos foi obtida a curva de eficiência térmica dos dois coletores utilizados em regime permanente.

Esses pontos medidos estão indicados nas Tabelas 5.1 e 5.2 e foram medidos entre março e maio de 2016. Para cada intervalo medido foi calculada a média dos valores obtidos experimentalmente de 30 em 30 segundos. A eficiência térmica de cada intervalo medido de cada coletor foi calculada pela Equação 3.8. Esse cálculo foi feito com a taxa mássica (\dot{m}) constante e com valor de 0,0317 kg/s (considerando a massa específica da água de 1000 kg/m³), o calor específico da água calculado pela Equação 3.4 em função da temperatura média (T_m) de entrada e saída do fluido para cada ponto.

A partir desses pontos foi possível traçar as retas de ajuste representando as curvas de eficiência do coletor híbrido térmico fotovoltaico e do coletor de placa plana convencional, representadas na Figura 5.3. Por meio dessa última reta pode-se obter o comportamento da eficiência de cada coletor pela Equação 3.7. E os parâmetros encontrados foram de $F'(\tau\alpha)_e =$

0,220 e $F'U_L = 3,968$ para o coletor PV/T e $F'(\tau\alpha)_e = 0,612$ e, $F'U_L = 7,531$ para o coletor de placa plana convencional.

Tabela 5.1 - Pontos de eficiência medidos do coletor PV/T.

Data	$[(T_m - T_a)/G_T]_{PV/T}$	$\eta_{PV/T}$	Data	$[(T_m - T_a)/G_T]_{PV/T}$	$\eta_{PV/T}$
01/03/2016	0,00076	0,233	17/03/2016	0,02222	0,143
08/03/2016	0,00701	0,215	18/03/2016	0,02245	0,102
14/03/2016	-0,00250	0,221	18/03/2016	0,02538	0,124
14/03/2016	0,00188	0,244	15/04/2016	-0,00257	0,207
15/03/2016	0,01769	0,164	15/04/2016	-0,00089	0,203
15/03/2016	0,01682	0,171	19/04/2016	0,00994	0,181
15/03/2016	0,02145	0,121	03/05/2016	0,02487	0,093
16/03/2016	0,02087	0,137	09/05/2016	0,00342	0,219
17/03/2016	0,01596	0,145	22/05/2016	0,00911	0,142

Tabela 5.2 - Pontos de eficiência medidos do coletor de placa plana.

Data	$[(T_m - T_a)/G_T]_{pp}$	η_{pp}	Data	$[(T_m - T_a)/G_T]_{pp}$	η_{pp}
01/03/2016	0,00126	0,587	17/03/2016	0,02299	0,452
08/03/2016	0,0077	0,557	18/03/2016	0,02331	0,417
14/03/2016	-0,00193	0,567	18/03/2016	0,02615	0,416
14/03/2016	0,00243	0,616	15/04/2016	-0,00172	0,666
15/03/2016	0,01840	0,479	15/04/2016	-0,00004	0,626
15/03/2016	0,01749	0,485	19/04/2016	0,01091	0,532
15/03/2016	0,02222	0,446	03/05/2016	0,02574	0,415
16/03/2016	0,02162	0,449	09/05/2016	0,00406	0,596
17/03/2016	0,02196	0,449	22/05/2016	0,00998	0,511

Com as retas traçadas pode-se observar que os parâmetros encontrados do coletor de placa plana, apesar do mesmo não estar em condições ideais de conservação, ainda assim tem suas propriedades ópticas e térmicas melhores comparado ao coletor PV/T. A menor inclinação do coletor híbrido térmico fotovoltaico é devido a camada de ar existente entre a serpentina que o compõe para a passagem de água e o módulo fotovoltaico. O valor da

eficiência térmica máxima do coletor de placa plana é superior ao coletor híbrido térmico fotovoltaico e suas perdas térmicas são bem menores que o segundo.

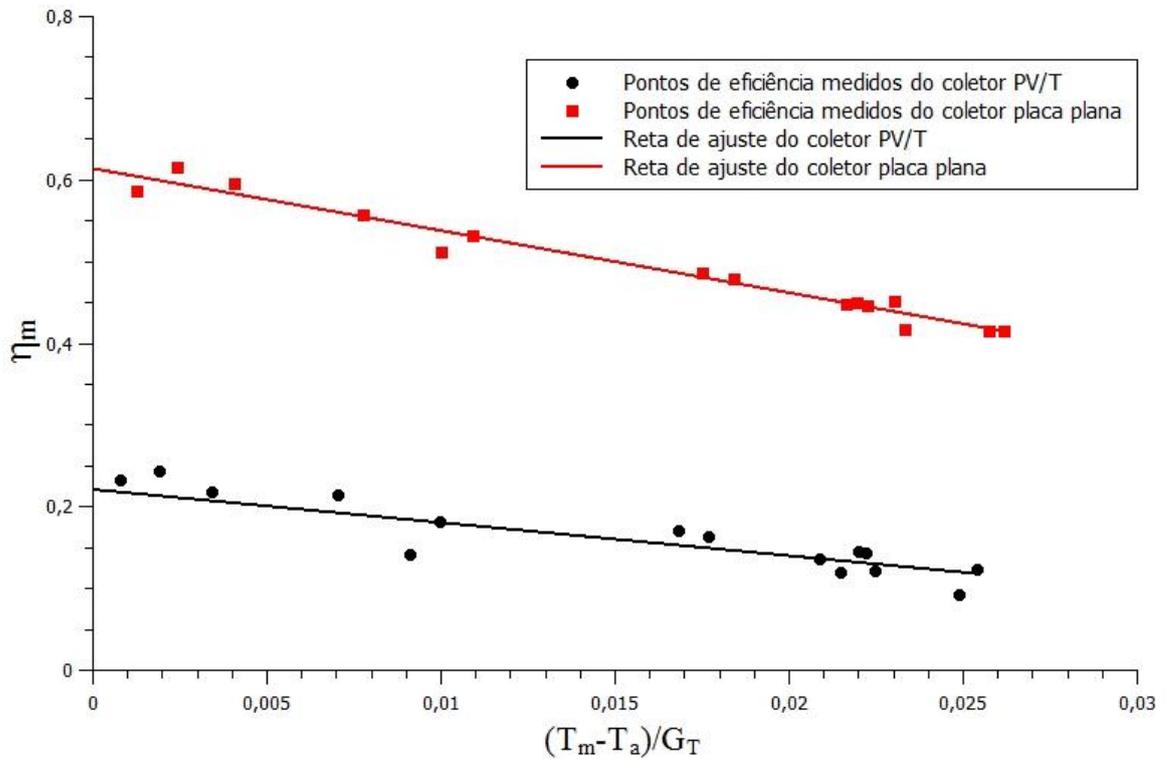


Figura 5.3 - Temperatura média da água do coletor PV/T e o de placa plana durante o ensaio para determinar a constante de tempo.

5.1.3 Incerteza experimental no cálculo de eficiência térmica

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 houve no presente trabalho o aproveitamento de uma bancada existente e a utilização de instrumentos já calibrados, foram utilizados os mesmos valores de incertezas citados anteriormente. Então, as seguintes grandezas com seus respectivos valores de incertezas estão indicadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Valores de incertezas de cada grandeza medida.

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)	$\pm 0,12 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura de saída (T_s)	$\pm 0,12 \text{ }^\circ\text{C}$
Irradiância (G_T)	$\pm 3\% \text{ FDE}$
Área do coletor (A_c)	$\pm 0,01 \text{ m}^2$

O calor específico e a temperatura média são grandezas dependentes de valores medidos pela instrumentação utilizada. Portanto, os valores de suas incertezas foram calculados baseados na Equação 3.19. Este método estima a propagação do desvio padrão de uma grandeza a partir do desvio padrão de suas variáveis dependentes conforme as Equações 5.1 e 5.2. Os valores de incertezas da temperatura média (T_m) e do calor específico (C_p) calculados para cada ponto foram menores que 1%.

$$u_{T_m} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_m}{\partial T_e} u_{T_e}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_m}{\partial T_s} u_{T_s}\right)^2} \quad (5.1)$$

$$u_{C_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_p}{\partial T_m} u_{T_m}\right)^2} \quad (5.2)$$

na qual u_{T_m} , u_{T_e} , u_{T_s} e u_{C_p} são as incertezas propagadas da temperatura média, da temperatura de entrada, da temperatura de saída e do calor específico, respectivamente.

Com todos os valores de incerteza dos parâmetros utilizados para a obtenção da eficiência térmica para cada coletor foi possível encontrar a incerteza referente a cada ponto medido para essa eficiência descrita pelo mesmo método citado acima e indicada na Equação 5.3. Os valores obtidos da incerteza a cada ponto utilizado para determinar a curva da eficiência tanto do coletor híbrido térmico fotovoltaico quanto o de placa plana não passaram de 4%.

$$u_{\eta_m} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_m}{\partial \dot{m}} u_{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_m}{\partial C_p} u_{C_p}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_m}{\partial \Delta T} u_{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_m}{\partial G_T} u_{G_T}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_m}{\partial A_c} u_{A_c}\right)^2} \quad (5.3)$$

na qual u_{η_m} , $u_{\Delta T}$, u_{G_T} e u_{A_c} são as incertezas propagadas da eficiência térmica, da diferença de temperatura, da irradiância e da área de abertura do coletor, respectivamente.

5.2 Ensaio fotovoltaico

5.2.1 Curva característica

Para a obtenção das curvas características de cada módulo utilizado foram feitos ensaios no simulador solar existente no LABSOL conforme as normas estabelecidas, ou seja, nas condições citadas na Seção 3.2 do presente trabalho. Essas curvas I-V e P-V estão indicadas nas Figuras 5.4 e 5.5.

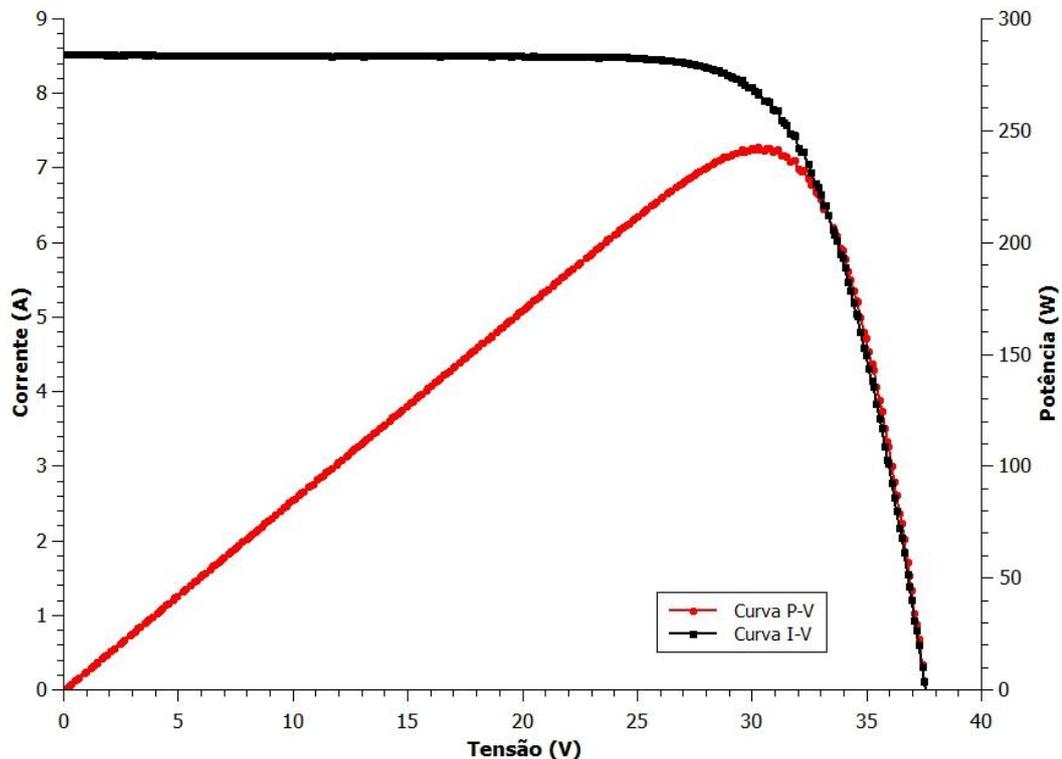


Figura 5.4 - Curvas I-V e P-V do coletor híbrido térmico fotovoltaico.

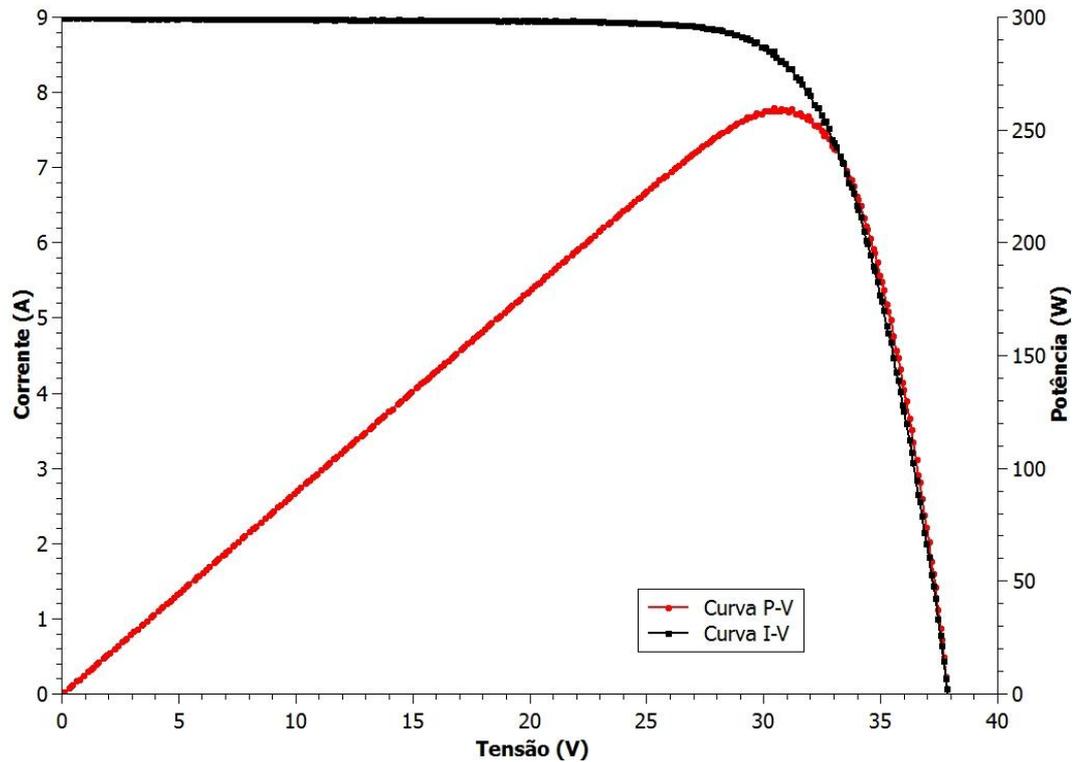


Figura 5.5 - Curvas I-V e P-V do módulo fotovoltaico convencional.

Com essas curvas características foram encontrados novos valores das suas especificações conforme Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Valores das especificações dos módulos utilizados após teste.

Especificações após teste	Módulo FV	Módulo PV/T
Potência Máxima [W]	259,23	242,20
Tensão Circuito Aberto [V]	37,89	37,56
Tensão Potência Máxima [V]	30,70	30,27
Corrente Curto Circuito [A]	8,999	8,533
Corrente Potência Máxima [A]	8,444	8,001
Fator de Forma	0,760	0,756

5.2.2 Eficiência elétrica

Os valores da potência máxima de cada módulo nas condições de testes são distintos ($P_{FVm} = 259,3 \text{ W}$ e $P_{PV/Tm} = 242,2$). Para uma comparação plausível da eficiência elétrica,

uma correção da potência gerada a cada ponto do coletor PV/T medido foi feita. Essa correção é apresentada na Equação 5.4.

$$P_{PV/T \text{ corrig}} = P_{PV/T} \cdot \left(\frac{P_{FVm}}{P_{PV/Tm}} \right) \quad (5.4)$$

na qual $P_{PV/T \text{ corrig}}$ é a potência do coletor PV/T corrigido, $P_{PV/T}$ é a potência do coletor PV/T medida em um ponto, P_{FVm} é a potência do módulo fotovoltaico convencional máxima obtida em teste, $P_{PV/Tm}$ é a potência do coletor híbrido térmico fotovoltaico máxima obtida em teste.

Essa correção pode ser validada, analisando o comportamento das potências elétricas de cada módulo ao longo de um dia em que a temperatura ambiente foi menor que 25°C. Durante esse dia as temperaturas dos módulos foram aproximadamente as mesmas, com isso, não há uma diferença significativa nas suas eficiências elétricas medidas. A comparação pode ser apreciada na Figura 5.6.

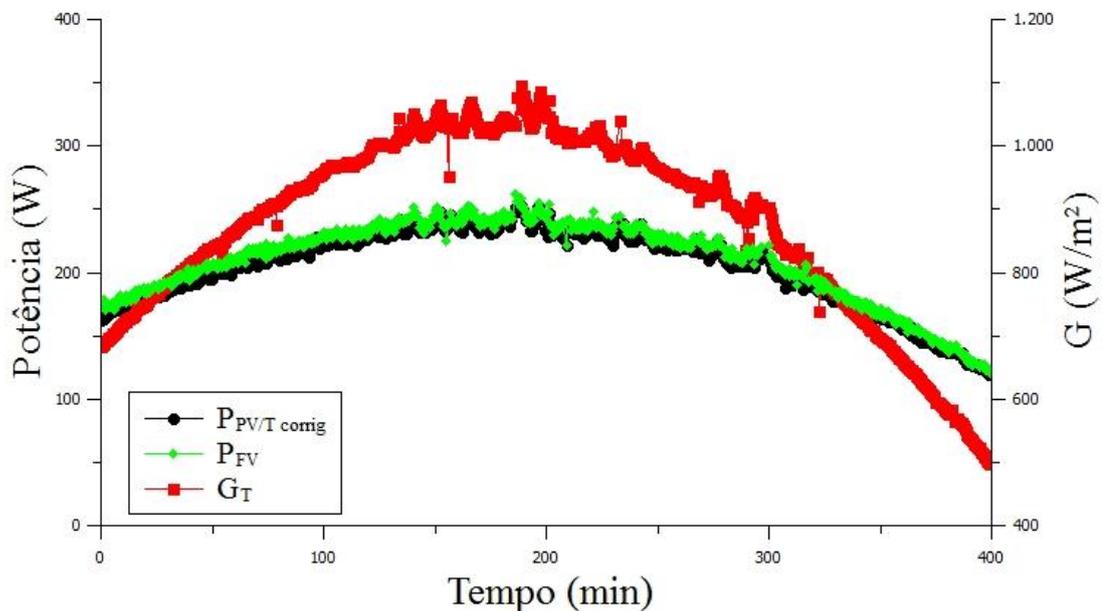


Figura 5.6 - Potência elétrica do PV/T corrigida, potência elétrica do FV e irradiação (G_T) medidas em cada ponto em função do tempo.

Com a medição da irradiância, da corrente e da tensão a cada 30 segundos, foi possível calcular a potência correspondente a cada instante. Por fim, a eficiência elétrica para cada

módulo foi calculada conforme a Equação 3.10. Como citado anteriormente, o coletor PV/T tem uma potência nominal inferior ao módulo FV e, com isso, uma eficiência elétrica também menor na condição padrão ($\eta_{eletPV/T} = 0,148$ e $\eta_{eletFV} = 0,159$). Com a correção de potência da Equação 5.4, as eficiências ficam iguais.

Para melhor visualização do comportamento da eficiência elétrica de cada módulo em função da sua temperatura, os dados foram medidos em um intervalo de 20 minutos. Esse intervalo foi escolhido porque a temperatura de entrada de água no coletor híbrido térmico fotovoltaico se mantém mais estável. Nesse período de tempo, as condições climáticas como irradiância solar e temperatura ambiente, que podem influenciar no resultado da eficiência elétrica, têm variação relativamente baixa. Nesses intervalos foram analisados casos da eficiência elétrica em função da temperatura do módulo.

A temperatura de entrada da água do coletor PV/T, temperatura ambiente média e irradiância média são de 44°C , $22,3^{\circ}\text{C}$ e $872,3\text{ W/m}^2$, respectivamente. Com essas condições, a diferença de temperatura dos módulos é inferior a 3°C ($T_{FV} - T_{PV/T} < 3^{\circ}\text{C}$), no intervalo indicado. A diferença da eficiência elétrica entre eles, por se encontrarem em temperaturas semelhantes, é nula. Esses dados estão representados na Figura 5.7 que mostra a temperatura de cada módulo e os pontos de eficiência elétrica medidos pelo tempo.

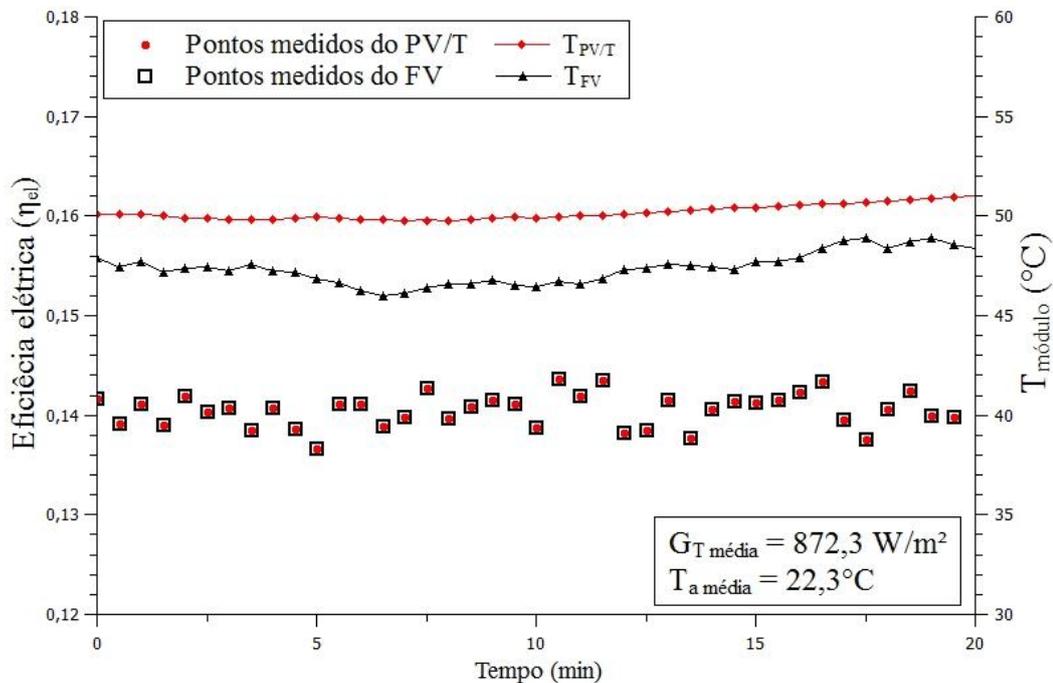


Figura 5.7 - Diferença de temperatura entre os módulos menor que 3°C : $G_{T\text{média}} = 872,3\text{ W/m}^2$ e $T_{a\text{média}} = 22,3^{\circ}\text{C}$.

No segundo caso, a diferença média das temperaturas entre os módulos é de $4,5^{\circ}\text{C}$ ($T_{PV/T} - T_{FV} = 4,5^{\circ}\text{C}$), essa diferença pode ser visualizada na Figura 5.8. A temperatura de entrada do coletor híbrido térmico fotovoltaico é de 31°C . Apesar dessa diferença ser relativamente baixa, houve um aumento perceptível no valor da eficiência elétrica do coletor PV/T em relação ao módulo FV convencional.

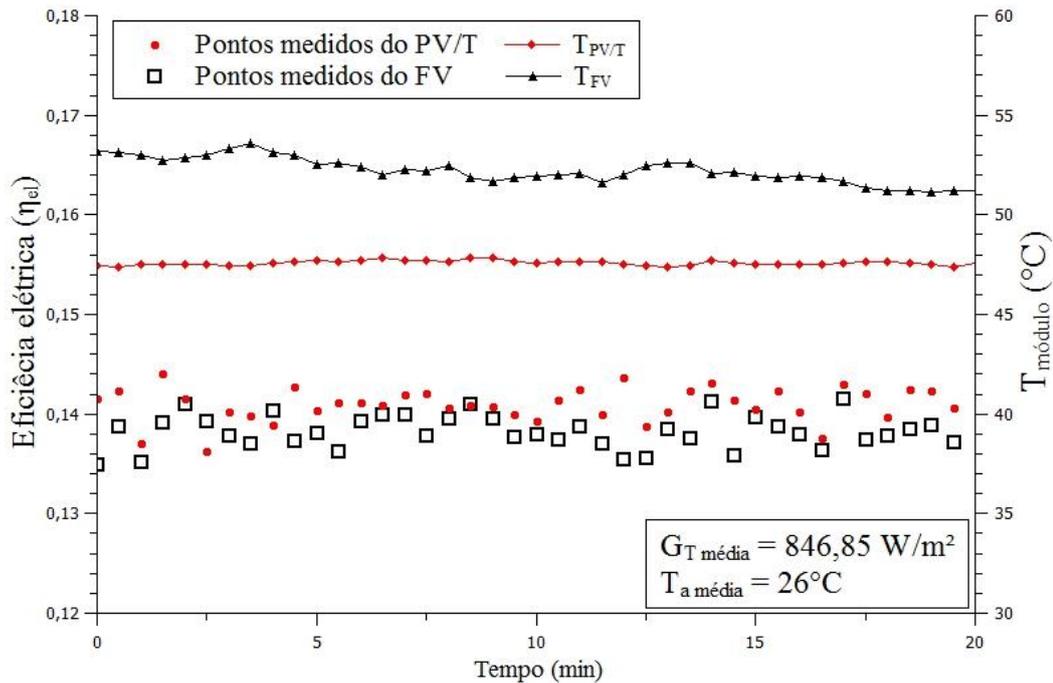


Figura 5.8 - Diferença de temperatura entre os módulos média de $4,5^{\circ}\text{C}$: $G_{T \text{ média}} = 846,85 \text{ W/m}^2$ e $T_{a \text{ média}} = 26^{\circ}\text{C}$.

Aumentando essa diferença de temperatura entre os módulos para 25°C ($T_{PV/T} - T_{FV} = 25^{\circ}\text{C}$), a eficiência elétrica do coletor PV/T teve um aumento considerável, como visto na Figura 5.9. A potência elétrica do coletor PV/T média no intervalo de medição teve um acréscimo aproximado de 5 W .

Com esses resultados, notou-se também que, a medida que a temperatura interna da água aumenta, a eficiência elétrica do coletor híbrido térmico fotovoltaico diminui, já que quanto maior for a temperatura da água que flui no seu interior, a temperatura das suas células fotovoltaicas também aumenta.

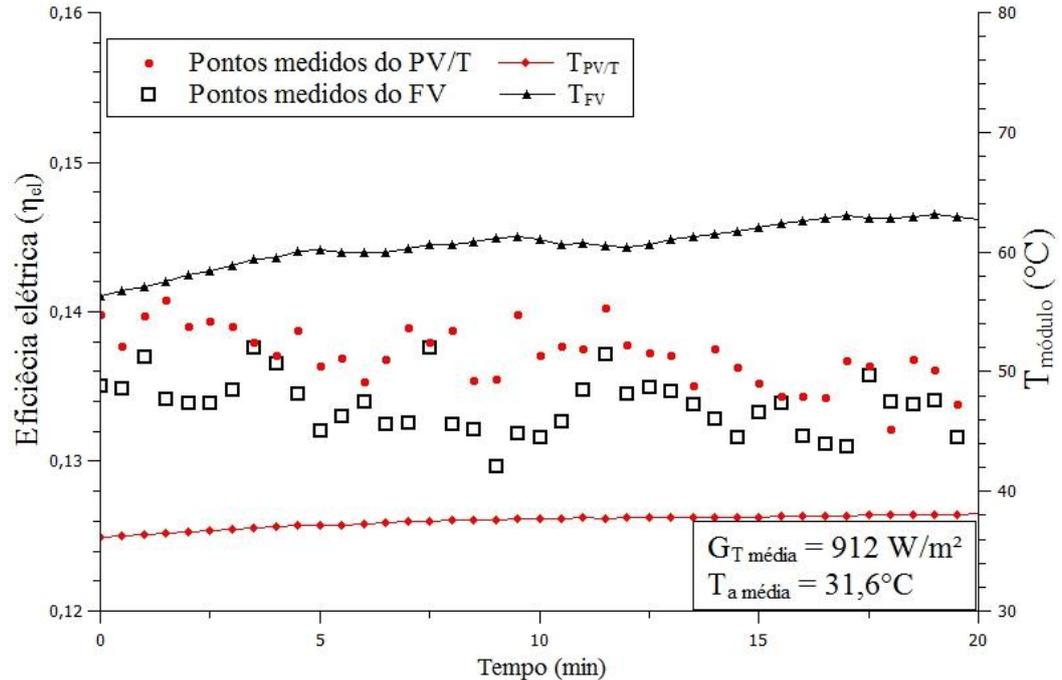


Figura 5.9 - Diferença de temperatura entre os módulos média de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$: $G_{T\text{ média}} = 912\text{ W/m}^2$ e $T_{a\text{ média}} = 31,6^{\circ}\text{C}$.

Representando esses resultados de forma mais quantitativa, uma análise foi feita baseando-se na Seção 3.2.1. Para isso, foram utilizados os dados da irradiância sobre a superfície inclinada de 45° e temperatura ambiente, todos correlacionados aos dados de irradiação horária durante um ano na cidade de Porto Alegre. Esses dados foram obtidos com o uso do software RADIASOL2 [Krenzinger e Bugs, 2010].

Para o módulo fotovoltaico foi empregado a Equação 3.16, para um NOCT de 45°C especificado pelo fabricante. Isso resultou em um $K_t = 0,03125\text{ }^{\circ}\text{C/Wm}^{-2}$. Com esses dados, foi simulado no software CREARRAY [Krenzinger e Adams, 2000]. Introduzindo os dados em questão (irradiância e temperatura do módulo) no programa CREARRAY, foram gerados resultados da potência elétrica máxima em intervalos de uma hora ao longo de um ano. Somando esses valores obtidos encontrou-se um valor de 384 kWh de energia anual.

No caso do coletor híbrido térmico fotovoltaico, a temperatura do módulo não depende somente da temperatura ambiente e da irradiância, mas também da temperatura de entrada da água (T_e). Por esse motivo, foi feita uma aproximação com os dados medidos ao longo dos testes desse coletor PV/T. Estes dados foram escolhidos baseando-se na temperatura de entrada da água aproximadamente igual a temperatura ambiente. Essa aproximação está representada na Figura 5.10. Com isso, encontrou-se o valor para K_t de $0,0075\text{ }^{\circ}\text{C/Wm}^{-2}$. Sua

temperatura nominal também é de 45°C. Realizando o mesmo procedimento usando o CREARRAY, encontrou-se uma energia elétrica, ao longo de todo ano, no valor de 406 kWh.

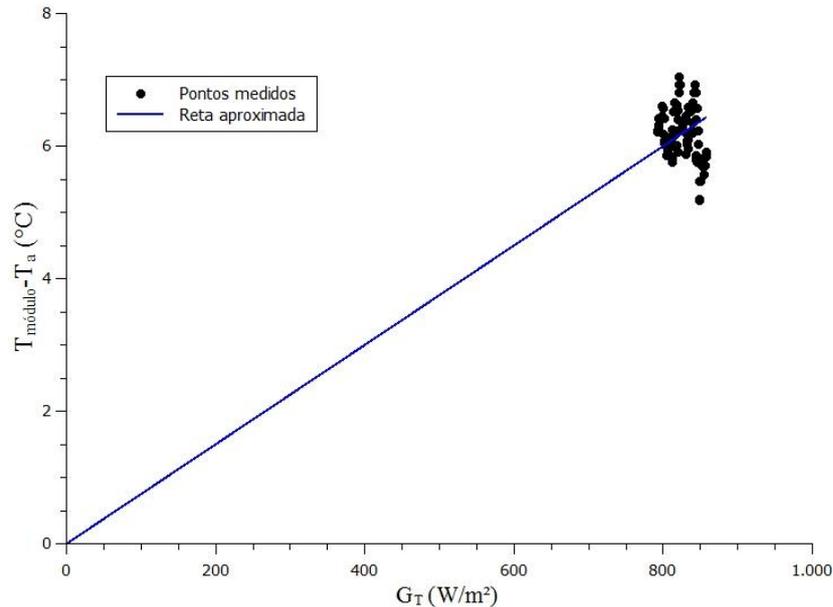


Figura 5.10 - Reta de aproximação para o cálculo de K_t para o coletor PV/T.

Esses resultados mostram que o coletor PV/T produz 5,5% a mais de energia elétrica, durante um ano, diante do módulo fotovoltaico convencional nas mesmas condições a eles impostas. Essa diferença de geração de energia pode ser vista nas Figuras 5.11 e 5.12, que representa a variação de energia elétrica em um dia de verão (03/12) e um dia de inverno (12/07), respectivamente.

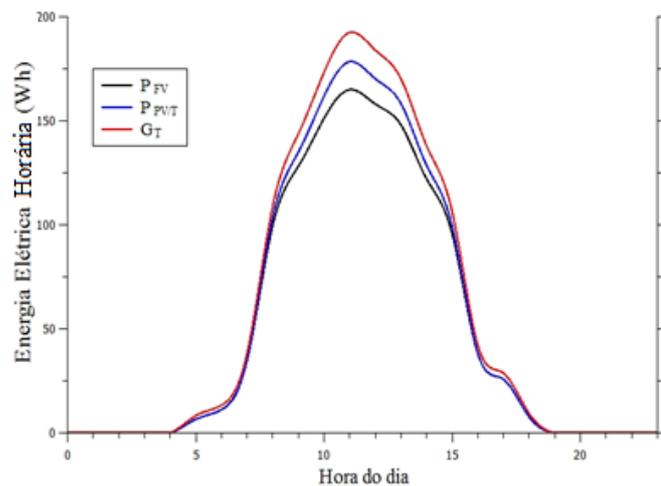


Figura 5.11 - Valores da energia produzida por hora do coletor PV/T e do módulo fotovoltaico para o 3º dia do mês de janeiro.

A partir dos mesmos dados meteorológicos obtidos do programa RADIASOL2 também foi possível calcular a quantidade de energia térmica gerada pelo coletor PV/T no valor de 590,4 kWh e para o coletor de placa plana de 947,5 kWh. Esse cálculo foi baseado em suas eficiências térmica máxima e nas suas áreas de abertura, mostrando que mesmo o coletor de placa plana ter uma área menor de abertura, fornece 38% a mais de energia térmica que o coletor PV/T.

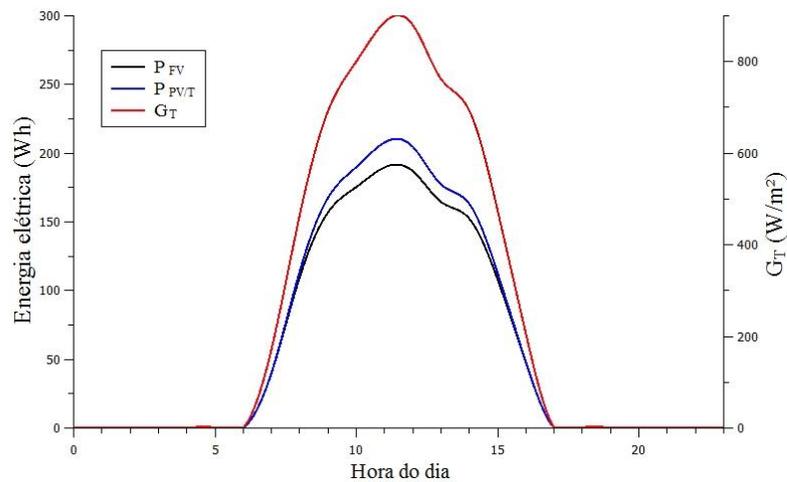


Figura 5.12 - Valores da energia produzida por hora do coletor PV/T e do módulo fotovoltaico para o 12º dia do mês de julho.

5.2.3 Incerteza experimental no cálculo de eficiência elétrica

As grandezas e suas incertezas utilizadas para o cálculo da eficiência elétrica de cada módulo medido estão indicadas na Tabela 5.5 abaixo.

Tabela 5.5 - Valores de incertezas de cada grandeza medida.

Grandeza	Valor de incerteza
Corrente (I)	$\pm 0,005$ A
Tensão (V)	$\pm 0,005$ V
Irradiância (G_T)	$\pm 3\%$ FDE (FDE = 1000 W/m^2)
Área do coletor (A_c)	$\pm 0,01$ m^2

Com esses valores da Tabela 5.5, a incerteza de medição da eficiência elétrica de cada ponto medido foi calculada pelo mesmo método citado na Seção 5.1.4, pela Equação 5.5.

$$u_{\eta_{el}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_{el}}{\partial I} u_I\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{el}}{\partial V} u_V\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{el}}{\partial G_T} u_{G_T}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{el}}{\partial A} u_A\right)^2} \quad (5.5)$$

na qual $u_{\eta_{el}}$, u_I , u_V , u_{G_T} e u_A são as incertezas propagadas da eficiência elétrica, da corrente, da tensão, da irradiância e da área do coletor, respectivamente.

Todos os valores de eficiência elétrica obtidos, tanto do coletor híbrido térmico fotovoltaico e do módulo fotovoltaico convencional tiveram valores de incerteza inferiores a 4%.

6 CONCLUSÕES

Para o estudo comparativo do coletor híbrido térmico fotovoltaico com um coletor térmico de placa plana e um módulo fotovoltaico convencional, o sistema foi instalado em uma bancada já existente no LABSOL – UFRGS que possibilitou o ensaio desses três tipos de tecnologias distintas que utilizam energia solar como fonte. Esses ensaios foram realizados a fim de comparar a eficiência térmica e elétrica nas mesmas condições.

Realizou-se a comparação do sistema de aquecimento de água por meio de um coletor híbrido térmico fotovoltaico e um coletor térmico de placa plana. Os resultados obtidos mostraram que o coletor PV/T tem baixo desempenho, com eficiência térmica três vezes menor do que o coletor de placa plana convencional, mesmo com o segundo em condições abaixo do ideal, que é em torno de 80 a 90% de eficiência. Essa diferença significativa da eficiência térmica ocorreu pelo fato de que o coletor de placa plana tem menor perda térmica devido à sua cobertura de vidro. O coletor híbrido térmico fotovoltaico, por não ter essa cobertura de vidro, se comporta de forma semelhante a um coletor de placa plana sem cobertura, que também tem sua eficiência térmica baixa.

Para a comparação da eficiência elétrica, um módulo fotovoltaico também foi instalado junto ao sistema. Antes dos dois módulos serem expostos em condições meteorológicas reais, eles passaram por um ensaio em um simulador solar sob condições determinadas por normas internacionais regulamentadas com os valores de irradiância solar e temperatura das células iguais a 1.000 W/m^2 e $25 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. Isso resultou em potências máximas distintas de $242,3 \text{ W}$ para o coletor PV/T e $259,3 \text{ W}$ para o módulo fotovoltaico. Com essa diferença foi necessária uma correção da potência obtida experimentalmente pelo coletor híbrido térmico fotovoltaico para a comparação mais precisa com os resultados adquiridos pelo módulo fotovoltaico. Sendo testado com as mesmas condições ambientes do módulo fotovoltaico, o resfriamento causado pela água que flui na parte posterior do coletor PV/T ocasionou em um maior ganho de eficiência elétrica do primeiro módulo.

Para os resultados quantitativos dessas eficiências foram utilizados dados do software RADIASOL 2, disponível pelo LABSOL, da média de irradiância e temperatura ambiente durante um ano na cidade de Porto Alegre, com o ângulo de inclinação de 45° . A partir desses dados, a energia elétrica anual de cada módulo foi obtido simulando esses dados no software CREARRAY, também acessível no laboratório. A diferença anual entre os módulos de energia elétrica foi de $5,5 \%$, indicando que o coletor híbrido térmico fotovoltaico tem maior

rendimento, ao longo do tempo, em relação ao módulo fotovoltaico. Para o rendimento térmico, o coletor de placa plana, mesmo com menor área de abertura, gera 38% a mais de energia térmica, ao longo de um ano, que o coletor PV/T.

Com esses resultados pode-se concluir que o coletor híbrido térmico fotovoltaico, testado nesse trabalho, pode ser melhorado na sua parte térmica. A sua inferioridade no seu rendimento térmico faz com que o coletor PV/T talvez não seja útil para o uso doméstico em regiões com climas mais frios, por exemplo. Essa melhoria pode ser feita fixando os tubos das serpentinas usadas para circulação de água na parte posterior do módulo fotovoltaico para melhorar o contato, eliminando o ar entre a tubulação e a placa fotovoltaica.

Uma camada de vidro pode ajudar no aumento da eficiência térmica de um coletor PV/T, mas isso pode acarretar em um aumento bastante significativo na temperatura das suas células fotovoltaicas, além das perdas ópticas devido a reflexão desta cobertura. Com certeza o coletor PV/T que foi testado é mais útil em regiões onde o clima é mais quente e onde não há necessidade do fluido estar a temperaturas acima de 50°C.

6.1. Propostas futuras

Para uma verificação mais precisa da quantidade de energia gerada de um coletor híbrido térmico fotovoltaico pode-se supor uma análise de dados experimentais com tempo maior ao longo de um dia, ensaiando com mais valores de temperatura de entrada, durante um ano. Isto porque, como citado na Seção 5.2.2, a temperatura das suas células fotovoltaicas depende também da temperatura de entrada da água na sua parte térmica. A partir desses dados obter-se-ia uma nova equação proveniente dessa temperatura de entrada, além da temperatura ambiente e da irradiância solar incidente sobre o coletor PV/T, podendo assim, simular o sistema com o coletor PV/T para vários climas brasileiros.

Dada a variedade de tipos de coletores híbridos térmico fotovoltaicos, poderia se fazer os mesmos testes para diferentes coletores PV/T, mostrando qual o mais eficaz tanto na parte térmica quanto na parte elétrica.

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.

ANEEL. Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Atlas da Energia Elétrica do Brasil, 3ª Edição**. Brasília, 2008. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acesso em dez. 2015.

ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. **ASHRAE 93-2003- Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors**, Atlanta, 2003.

Chow, T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. **Applied Energy**, v. 87, Issue 2, p. 365-379, February 2010.

de Vries, D. W. **Design of a photovoltaic/thermal combi – panel**, Eindhoven Technical University, 1998.

Dubey, S., Sarvaiya, J. N., Seshadri, B. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World - A Review. **Energy Procedia**, v. 33, p. 311-321, 2013.

Duffie, J. A., Beckman, W. A.; **Solar Engineering of Thermal Processes**, fourth Edition, John Wiley & Sons, 2013.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional**, Rio de Janeiro, 2015.

Garg, H. P., Agarwal, R. K. Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells. **Energy Conversion and Management**, v. 36, Issue 2, p. 87-99, February 1995.

Gasparin, F. P. **Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado. PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

He, W., Zhang, Y., Ji, J. Comparative experiment study on photovoltaic and thermal solar system under natural circulation of water. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, Issue 16, p. 3369-3376, November 2011.

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

IEC 60904-3 - International Eletrotechnical Comission – **Photovoltaic Devices – Part 3: Measurement Principles for Terrestrial Photovoltaic (PV) Solar Devices with Reference Spectral Irradiance Data**, 2008.

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

Koech, R. K., Ondieki, H. O., Tonui, J. K., Rotich, S. K. A steady state thermal model for photovoltaic/thermal (pv/t) system under various conditions. **International journal of scientific & technology research**, v. 1, ISSUE 11, december 2012.

Krenzinger, A.; Adams, T. R. **CREARRAY – Programa de Análise de Sistemas Fotovoltaicos**. Laboratório de Energia Solar – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

Krenzinger, A. e Bugs, R. C. Radiasol2: Software para sintetizar dados de radiação solar. **IV Conferência Latino Americana de Energia Solar (IV ISES CLA) e XVII Simpósio Peruano de Energia Solar (XVII –SPES)**, Cuzco, 05 de nov. 2010.

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.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Energia Solar no Brasil e Mundo. Núcleo de estudos estratégicos de energia**, 2014. Disponível em [http://www.mme.gov.br/documents/10584/1143612/24+-+Energia+Solar+2014+-+Brasil+e+Mundo+\(PDF\)](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1143612/24+-+Energia+Solar+2014+-+Brasil+e+Mundo+(PDF)).

Pinho, J. T., Galdino, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, CEPTEL – CRESESB, Rio de Janeiro, 2014

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

Rosli, M.A.M., Miska, S., Sopian, K. , Mat, S., Sulaiman, M. Y., Salleh, E. Thermal Efficiency of the Photovoltaic Thermal System with Serpentine Tube Collector, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 699, pp. 455-461, 2015.

Sandnes, B., Rekstad, J. A photovoltaic/thermal (pv/t) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model. **Solar Energy**, v. 72, n° 1, pp. 63–73, 2002.

Santos, C. F., Ancines, C. A. Krenzinger, A. Utilização de um controlador de temperatura para teste em coletores híbridos térmico-fotovoltaicos. **VI Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Belo Horizonte, 2016.

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.

Wolf, M. Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences. **Energy Conversion**, v. 16, Issue 1-2, p. 79-90, junho, 1976.

Zondag, H. A. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, p. 891-959, May 2008.

Zondag, H. A., de Vries, D. W., van Helden, W. G. J., van Zolingen, R. J. C., van Steenhoven, A. A. The yield of different combined PV-thermal collector designs. **Solar Energy**, v. 74, Issue 3, p. 253-269, March 2003.