

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Eros Gimenes de Queiroz

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VAZÃO SOBRE A
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE PAINÉIS
SOLARES HÍBRIDOS**

Trabalho de Graduação
2018

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Eros Gimenes de Queiroz

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VAZÃO SOBRE A
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE PAINÉIS
SOLARES HÍBRIDOS**

Orientador

Prof Dr Ten Cel Márcio Antonio da Silva Pimentel (ITA)

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Gimenes de Queiroz, Eros
Estudo da influência da vazão sobre a eficiência energética dos coletores solares híbridos / Eros
Gimenes de Queiroz
São José dos Campos, 2018.
70f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Civil – Instituto Tecnológico de Aeronáutica,
2018. Orientador: Prof Dr Ten Cel Marcio Marcio Antonio da Silva Pimentel.

1. Coletores solares; 2. Painéis; 3. Conversão de energia; 4. Mecanismos; 5. Temperatura; 6. Engenharia mecânica. II. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. III. Estudo da influência da vazão sobre a eficiência energética dos coletores solares híbridos

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GIMENES DE QUEIROZ, Eros. **Estudo da influência da vazão sobre a eficiência energética dos coletores solares híbridos**. 2018. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Eros Gimenes de Queiroz

TÍTULO DO TRABALHO: Estudo da influência da vazão sobre a eficiência energética dos coletores solares híbridos

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2018

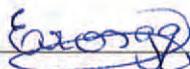
É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



Eros Gimenes de Queiroz
Rua H8B, 236 – Campus do DCTA
12228-461, São José dos Campos - SP

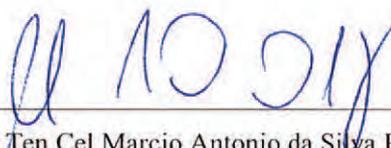
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VAZÃO SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE PAINÉIS SOLARES HÍBRIDOS

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Eros Gimenes de Queiroz

Autor



Prof Dr Ten Cel Marcio Antonio da Silva Pimentel

Orientador



Prof Dr Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 22 de novembro de 2018

Aos meu pais Ivani Rodrigues de Queiroz
e Odeon Rodrigues de Queiroz.

Agradecimentos

Agradeço, acima de tudo, aos meus pais por me incentivarem desde de sempre a seguir meu sonho de me tornar um engenheiro formado pelo ITA. A toda minha família e aos amigos do Espírito Santo por participarem da minha formação de caráter e ajudarem a me tornar a pessoa que sou hoje. Agradeço a todos meus amigos que o instituto me proporcionou por fazerem parte dessa caminhada tanto nos bons, quanto nos maus momentos.

Agradeço também a todos que foram meus professores durante o ITA por contribuírem com a minha formação profissional e, em especial, ao meu orientador Tenente Coronel Marcio Antonio da Silva Pimentel pelo auxílio com a base teórica necessária para o desenvolvimento desse trabalho e por todo auxílio fornecido durante os ensaios em campo e ao meu relator Wilson Cabral de Sousa Júnior pela paciência em todos momentos críticos desse estudo.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao Luiz Carlos Gavão e ao Leonardo Mata Zechlinski pela disponibilização de todos equipamentos necessários para essa pesquisa e ao Dilnei Augusto de Oliveira por todo o tempo dedicado na ajuda da montagem do sistema de medição e aquisição de dados, o qual foi essencial para realização desse trabalho.

A todos vocês, obrigado!

"Rise above. Focus on science".

(Sanchez, Rick)

Resumo

Esse trabalho consiste em um estudo dos fatores de influência na eficiência dos coletores solares híbridos. Tem-se como hipótese que para cada valor de irradiância solar, há uma vazão que geraria o maior ganho térmico e elétrico para o coletor. Dessa hipótese, tem-se a consequência de que em regime permanente seria possível descobrir se o sistema se encontra na vazão ótima apenas analisando a temperatura de entrada, de saída e do painel. Dessa forma, foi realizado um estudo da influência da vazão sobre a eficiência dos coletores solares híbridos tendo a temperatura como parâmetro de controle. Por meio desse, foram obtidas as eficiências do painel híbrido para o caso de vazão ótima, o que resultou em uma eficiência térmica de 70% e em um ganho de eficiência elétrica de 7,19% em relação ao painel fotovoltaico. Por fim, descobriu-se que o melhor parâmetro de controle é a temperatura da superfície do painel híbrido.

Abstract

This work consists in a study of the influence factors on the efficiency of hybrid solar collectors. It is hypothesized that for each value of solar irradiance, there is a flow that would generate the greatest thermal and electric gain for the collector. From this hypothesis, one has the consequence that in permanent regime it would be possible to find out if the system is in its optimum flow only by analyzing the inlet, outlet and panel temperature. In this way, was realized a study of the influence of the flow on the efficiency of the hybrid solar collectors having the temperature as control parameter. The efficiency of the hybrid panel was obtained in the case of optimum flow, which resulted in a thermal efficiency of 70% and an electric efficiency gain of 7,19% in relation to the photovoltaic panel. Finally, it was found that the best control parameter is the surface temperature of the hybrid panel.

Lista de Figuras

Figura 1. Modelo de operação de um sistema de aquecimento solar (ABNT NBR 15569, 2008):	20
Figura 2. Coletor solar plano fechado (HELIOTEK, 2006, apud SLEMAN, 2006).....	22
Figura 3. Coletor solar plano aberto (HELIOTEK, 2006, apud SLEMAN, 2006)	22
Figura 4. Coletor solar de tubos a vácuo (ENIVRO-FRIENDLY, 2005, apud SLEMAN, 2006)	23
Figura 5. Concentradores solares (SUNLAB, 2001, apud SLEMAN, 2006).....	24
Figura 6. Trajetória do sol e desvio do Norte geográfico (ângulos azimutais de superfície) (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011).....	25
Figura 7. Esquema de associação de coletores (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011).....	26
Figura 8. Esquema de aquecimento solar em circuito indireto, com fonte complementar de calor e reservatório térmico (FARINA, 2009).....	28
Figura 9. Esquema de aquecimento solar em circuito indireto, com fonte complementar de calor e trocador de calor de placas (FARINA, 2009).....	29
Figura 10. Trocador de calor do tipo placa (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011)	30
Figura 11. Trocador de calor do tipo serpentina (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011)	30
Figura 12. Trocador de calor do tipo camisa (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011).....	30
Figura 13. Esquema simplificado de controle de temperatura diferencial (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011)	31
Figura 14. Rendimento de diversos tipos de coletores frente a diferença de temperatura entre o coletor e o ambiente (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011)	33
Figura 15. Eficiência exergetica em função da área dos coletores e da vazão do sistema (FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009).....	39

Figura 16. Esquema simplificado de uma célula fotovoltaica (DEMONTI, 1998).....	40
Figura 17. Curva de corrente x tensão de um painel fotovoltaico para diferentes potências luminosas (LÓPEZ, 2009).....	41
Figura 18. Curva de potência x tensão de um painel fotovoltaico para diferentes potências luminosas (LÓPEZ, 2009).....	41
Figura 19. Curva de corrente x tensão de um painel fotovoltaico para diferentes temperaturas (LÓPEZ, 2009).....	42
Figura 20. Curva de potência x tensão de um painel fotovoltaico para diferentes temperaturas (LÓPEZ, 2009).....	42
Figura 21. Esquema simplificado do circuito estudado.....	45
Figura 22. Módulo fotovoltaico Globo Brasil GBR260P.....	46
Figura 23. Detalhamento dos painéis híbridos, vistas frontal e lateral.....	47
Figura 24. Detalhamento dos painéis híbridos, vista superior, suporte dos painéis e detalhes	47
Figura 25. Bomba periférica Amanco 98463	48
Figura 26. Bomba Jacuzzi 5A-M.....	49
Figura 27. Trocador de calor do tipo placa utilizado.....	49
Figura 28. Medidor de vazão Water Flow Sensor YF-S201	50
Figura 29. Solarímetro Solar Survey 100/200R	51
Figura 30. Irradiância e temperatura ambiente durante o horário dos ensaios	54
Figura 31. Gráfico obtido de eficiência x vazão para diversos valores de irradiação	55
Figura 32. Gráfico obtido de eficiência x diferença de temperatura entre o coletor e o ambiente	56
Figura 33. Gráfico obtido de eficiência x vazão para faixa de irradiação de 100 a 210 W/m ²	57

Lista de Tabelas

Tabela 1. Eficiência elétrica do painel híbrido (PVT) para a vazão estudada, para vazão nula (simulação de um painel fotovoltaico) e para vazão ótima	58
Tabela 2. Ganho relativo de eficiência elétrica entre o painel híbrido (PVT) com vazão de campo (Q) e com vazão nula (simulação de um painel fotovoltaico) entre o PVT com vazão ótima e com vazão nula e entre o PVT com vazão ótima e o com vazão de campo (Q)	58

Lista de Abreviaturas e Siglas

I-V	Corrente-Tensão
P-V	Potência-Tensão
PVT	Fotovoltaico/Térmico
L/min	Litros por minuto
L/(h.m ²)	Litros por hora metro quadrado
MPa	Mega pascal
kPa	Quilo pascal
STC	Standart Test Conditions

Lista de Símbolos

A_{ab}	área do absorvedor
A_p	área do painel
C_p	calor específico
$C_{TPmáx}$	coeficiente de temperatura da potência máxima
\dot{E}_d	taxa de exergia destruída
$\dot{E}_{d,\Delta P}$	taxa de exergia destruída pela queda de pressão
$\dot{E}_{d,\Delta T_f}$	taxa de exergia destruída pela diferença de temperatura entre a superfície do painel e o fluido
$\dot{E}_{d,\Delta T_s}$	taxa de exergia destruída pela diferença de temperatura entre a superfície do painel e o sol
\dot{E}_e	taxa de exergia de entrada
$\dot{E}_{e,f}$	taxa de exergia de entrada com fluxo de fluido
$\dot{E}_{e,Q}$	taxa de exergia da radiação absorvida
\dot{E}_s	taxa de exergia de saída
$\dot{E}_{s,f}$	taxa de exergia do fluido de saída
\dot{E}_v	taxa de exergia de vazamento
Ef_e	eficiência elétrica
$Ef_{e,STC}$	eficiência elétrica para temperatura padrão de teste STC
Ef_t	eficiência térmica
F'	fator de eficiência do coletor
Fr	fator de remoção de calor
G_t	fluxo de energia solar incidente

$K_{\tau\alpha}$	coeficiente de correção
\dot{m}	derivada da massa ao longo do tempo
ΔP	diferença de pressão
ΔP_e	diferença de pressão do fluido na entrada
ΔP_s	diferença de pressão do fluido na saída
Q_c	energia total incidente no coletor
Q_{uc}	energia útil do coletor
ΔT	diferença de temperatura
T_{amb}	temperatura ambiente
T_e	temperatura do fluido na entrada do coletor
T_{ma}	temperatura média do absorvedor
T_{mp}	temperatura média do painel
T_s	temperatura de saída
T_{sol}	temperatura aparente do sol
T_{STC}	temperatura padrão de teste STC
U_0	coeficiente global de transferência de calor da água para o ar
U_L	coeficiente global de transferência de calor
η_0	eficiência ótica
η_c	rendimento térmico instantâneo do coletor
η_{ex}	eficiência exergética térmica
ρ_0	massa específica da água
$(\tau\alpha)_e$	transmitância e absorptância efetivas
$(\tau\alpha)_n$	transmitância e absorptância para radiação normal ao coletor

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Motivação	18
1.2	Objetivos.....	18
1.2.1	Objetivos gerais	18
1.2.2	Objetivos específicos.....	18
1.3	Escopo.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Sistema de aquecimento solar.....	20
2.1.1	Coletores	20
2.1.2	Classificação dos coletores solares.....	21
2.1.3	Posicionamento dos coletores solares.....	24
2.1.4	Associação de coletores.....	25
2.1.5	Sistema de armazenamento	26
2.1.6	Sistema de aquecimento auxiliar	27
2.1.7	Sistema de aquecimento solar em circuito indireto	27
2.1.8	Sistemas de controle	31
2.1.9	Rendimento.....	32
2.1.10	Análise energética do rendimento	33
2.1.11	Análise exergética do rendimento	36
2.2	Painel solar fotovoltaico	40
2.2.1	Efeito da irradiância solar.....	41
2.2.2	Efeito da temperatura.....	42
2.3	Coletor solar híbrido	43
3	METODOLOGIA.....	45
3.1	Circuito	45
3.1.1	Especificação dos coletores solares híbridos.....	45
3.1.2	Bombas	48
3.1.3	Trocador de calor.....	49
3.2	Equipamentos de medidas	50
3.3	Execução	51

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5	CONCLUSÕES.....	60
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – PROGRAMA IMPLEMENTADO NA PLATAFORMA DE PROTOTIPAGEM ELETRÔNICA ARDUÍNO.....	63

1 Introdução

1.1 Motivação

Esse trabalho visa estudar a otimização da geração de energia em painéis híbridos o que se torna relevante especialmente em países tropicais com ampla variância de irradiância solar. Nesse ínterim, alguns autores têm estudado a relação da vazão do circuito primário com a eficiência dos coletores solares como (MOUSA, et al., 2018) e (AMINE, et al., 2017), havendo, contudo, carência de estudos com painéis híbridos. Portanto, o presente trabalho visa suprir essa ausência, oferecendo um estudo de campo em que se analisa a influência da vazão na eficiência de coletores solares híbridos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

Esse trabalho de graduação tem como objetivo estudar fatores que influenciam na eficiência dos coletores solares híbridos em estudo de campo específico.

1.2.2 Objetivos específicos

Dessa forma, no estudo em campo esse objetivo geral se dividiu em três objetivos específicos:

- Estudar a influência da vazão na eficiência dos painéis híbridos;
- Estimar as eficiências térmica e elétrica máximas
- Estudar a influência da temperatura dos painéis na eficiência dos painéis híbridos;
- Estudar a influência da irradiância solar na eficiência dos painéis híbridos.

1.3 Escopo

Visando atingir os objetivos explicitados, determinou-se o seguinte escopo seguido ao longo do estudo:

- Estudo na literatura sobre sistema de aquecimento solar, painéis fotovoltaicos, coletor solar híbrido e suas respectivas eficiências;
- Montagem de um sistema de coleta e aquisição de dados, compostos por sensores de temperatura, medidor de vazão e a plataforma de prototipagem eletrônica Arduíno;
- Coleta e aquisição temperaturas na entrada, saída e na placa do coletor híbrido para diferentes vazões no circuito;
- Visando simplificar os cálculos, desprezou-se o efeito dos ventos, medindo-se dados apenas em dias com baixa incidência de ventos;
- Análise dos dados obtidos e verificação de uma possível vazão ótima para cada incidência solar;
- Análise da relevância do ganho de eficiência do sistema.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Sistema de aquecimento solar

O sistema de aquecimento solar é constituído basicamente por três elementos principais (ABNT NBR 15569, 2008):

- Coletor(es) solar(es);
- Reservatório térmico;
- Sistema de aquecimento auxiliar.

O qual pode ter seu modelo de operação exemplificado pela Figura 1 (ABNT NBR 15569, 2008).

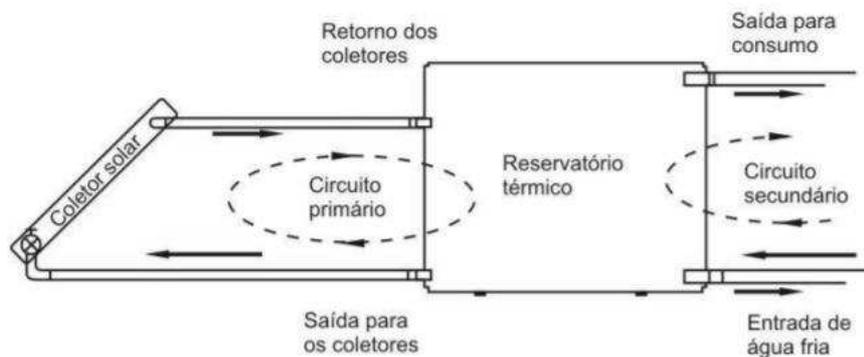


Figura 1. Modelo de operação de um sistema de aquecimento solar (ABNT NBR 15569, 2008):

2.1.1 Coletores

Os coletores solares são responsáveis pelo aquecimento do fluido de trabalho a partir da energia solar captada durante os períodos de insolação (ABNT NBR 15569, 2008).

O coletor plano recebe e utiliza a radiação solar na mesma superfície. É composto por cobertura transparente, tubulações por onde escoo o fluido a ser aquecido, placa absorvedora na cor preta, isolamento térmico e carcaça. Os coletores planos são utilizados para temperaturas da água abaixo de 93 °C (HUDSON; MARKELL, 1985, apud TADEU; BERNARDES; MENEZES; MONTORO; YUKARI; OLIVEIRA, 2007).

A placa absorvedora tem a função de converter a energia radiante em calor, transferi-la para as tubulações e, em seguida, para o fluido. Tanto as placas quanto as tubulações são construídas com metais de alta condutividade térmica, geralmente cobre, alumínio ou aço.

A cobertura transparente, geralmente feita de vidro comum, reduz as perdas radiativas e convectivas da placa absorvedora, sendo responsável pelo efeito estufa ao refletir de volta a radiação infravermelha para a placa.

Como fluido a ser aquecido nas tubulações pode-se utilizar a própria água (sistema direto), ar ou algum outro líquido (sistema indireto), quando necessária proteção contra o congelamento ou proteção anticorrosiva (em geral do cloro) dos tubos absorvedores. Atualmente, utiliza-se como fluido de transferência o etileno-glicol ou o propileno-glicol (LIMA, 2003, apud TADEU; BERNARDES; MENEZES; MONTORO; YUKARI; OLIVEIRA, 2007) no caso de sistemas indiretos.

É recomendável que o material isolante do coletor seja capaz de resistir a temperaturas de até 204 °C sem produzir substâncias voláteis (ASHRAE, 1996 apud LIMA, 2003, apud TADEU; BERNARDES; MENEZES; MONTORO; YUKARI; OLIVEIRA, 2007). Os materiais mais utilizados nessa isolação são: fibra mineral, fibra cerâmica, espuma de vidro, espuma de plástico ou fibra de vidro.

Conforme Lima (2003, p. 13), “as vantagens do coletor plano, em relação aos demais tipos, são: a simplicidade de construção, relativo baixo custo, nenhuma parte móvel, sem dificuldade de operar em dias nublados, relativa facilidade de reparo e durabilidade” (TADEU; BERNARDES; MENEZES; MONTORO; YUKARI; OLIVEIRA, 2007).

2.1.2 Classificação dos coletores solares

Os coletores solares podem ser classificados em coletores solares planos fechados e abertos, em coletores solares de tubos a vácuo, cilíndricos-parabólicos, de torres centrais e os discos parabólicos.

Os coletores solares planos fechados são utilizados para aquecer a água até uma temperatura de 60°C (PEREIRA, 2003, apud SLEMAN, 2006) e proporcionar o condicionamento ambiental a partir da energia solar. Um coletor solar plano fechado é constituído por uma caixa externa, isolamento térmico, tubos para escoamento do fluido no interior do coletor, placa absorvedora pintada de preto fosco para melhor absorção da energia solar, cobertura transparente e um sistema de vedação (PEREIRA et al., 2003, apud SLEMAN,

2006). Esta tecnologia já é dominada nacionalmente e encontra aplicação em residências, edifícios, hotéis, motéis, indústrias e hospitais.

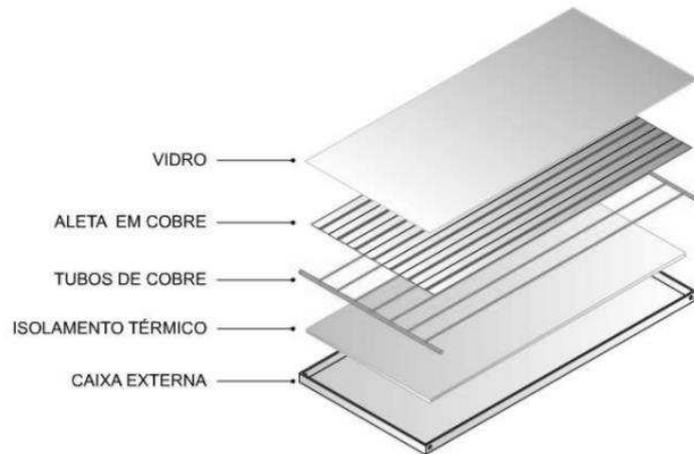


Figura 2. Coletor solar plano fechado (HELIOTEK, 2006, apud SLEMAN, 2006)

Os coletores solares planos abertos são utilizados para aquecimento de piscinas e operam a baixa temperatura, entre 28 e 30°C. Não possuem cobertura transparente, nem isolamento térmico; o corpo externo é feito na maioria das vezes de materiais termoplásticos, polipropileno, EPDM ou borrachas especiais. Ainda é um mercado muito incipiente no Brasil (PEREIRA, 2003, apud SLEMAN, 2006).



Figura 3. Coletor solar plano aberto (HELIOTEK, 2006, apud SLEMAN, 2006)

Os coletores solares de tubos a vácuo são coletores solares que, para diminuir ainda mais as perdas, utilizam vácuo em seu interior (da ordem de 10^{-4} mmHg) de modo a reduzir a zero suas perdas térmicas e, conseqüentemente, aumentar a temperatura final da água. São

compostos por uma série de tubos, cada um com um absorvedor, o que faz com que os raios solares incidam perpendicularmente em suas superfícies durante quase todo o dia, permitindo uma eficiência superior à dos coletores planos. São mais leves, facilitando sua instalação (ENVIROFRIENDLY, 2005, apud SLEMAN, 2006). São usados para gerar energia térmica para aquecimento de água, pré-aquecimento industrial e refrigeração solar (fonte quente em um ciclo de absorção) (ICAEN, 2003, apud SLEMAN, 2006).



Figura 4. Coletor solar de tubos a vácuo (ENIVRO-FRIENDLY, 2005, apud SLEMAN, 2006)

Os coletores solares cilindro-parabólicos utilizam espelhos na forma de cilindros para concentrar os raios solares em tubos receptores termicamente eficientes que contêm um fluido de transferência de calor. Este fluido é aquecido até 390 °C e bombeado através de uma série de trocadores de calor para produzir vapor superaquecido, que alimenta uma turbina convencional para produzir eletricidade. Já os coletores solares de torres centrais utilizam uma série de heliostatos (grandes espelhos que se movimentam individualmente conforme movimentação do sol) dispostos em círculos, para concentrar os raios solares em um receptor central, localizado no topo de uma torre central (OVERVIEW OF SOLAR THERMAL TECHNOLOGIES, 1998, apud SLEMAN, 2006). Por fim, os discos parabólicos funcionam como um receptor térmico que absorve a energia dos raios solares e a concentra e transforma em calor, que é transferido para um gerador ou máquina térmica, que transformará o calor do receptor em energia elétrica (SUN LAB, 2001, apud SLEMAN, 2006).

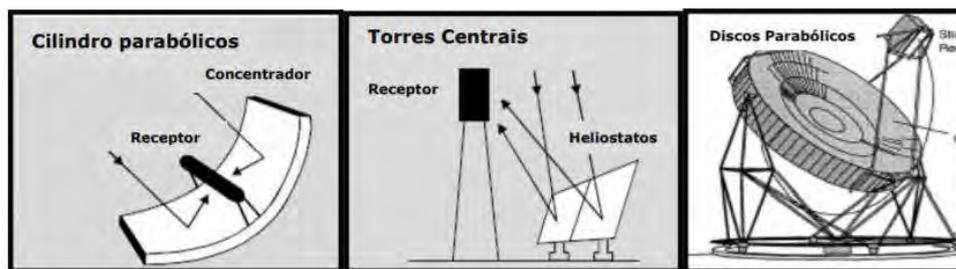


Figura 5. Concentradores solares (SUNLAB, 2001, apud SLEMAN, 2006)

2.1.3 Posicionamento dos coletores solares

O posicionamento do conjunto de coletores solares é essencial para o desempenho do sistema de aquecimento solar e sua compreensão possibilita a construção de instalações mais eficientes, onde se aproveita melhor a radiação do sol.

A inclinação em relação ao plano horizontal e a direção de instalação dos coletores solares são os dois elementos que influenciam o dimensionamento do sistema de aquecimento solar. Os coletores solares devem estar expostos ao sol de tal forma que a incidência da radiação solar atinja o coletor o mais que possível perpendicularmente. Como há uma variação da inclinação do sol, conforme a época do ano, os coletores são instalados com uma inclinação que maximiza a incidência da radiação solar nas horas de pico de radiação solar de acordo com o critério de projeto.

Como regra básica, identificada em diversas metodologias internacionais, é recomendada que a instalação possua uma inclinação equivalente à latitude da região onde será instalado o sistema solar, somando-se 10° . Como exemplo, para a cidade de São Paulo, localizada a latitude aproximada de 23° , recomenda-se a instalação dos coletores com 33° de inclinação. Dependendo da fonte onde é pesquisada a radiação solar incidente do local, há a informação da melhor inclinação para otimização do aproveitamento. Nesse critério, prioriza-se a incidência solar no inverno, considerando que o posicionamento inadequado nas demais estações é compensado pelo aumento da irradiância. Outros critérios eventualmente adotados consistem em adotar a inclinação aproximadamente igual à latitude local maximizando a absorção ao longo do ano (painéis fotovoltaicos) e até mesmo inclinações maiores maximizando a captação no verão quando a demanda energética é máxima (hotéis e pousadas próximos a praias por exemplo).

Além da inclinação, os coletores devem estar direcionados simétricos em relação à trajetória do sol, posição que permite o maior tempo de incidência do sol ao longo do dia. O

maior aproveitamento ocorre quando os coletores solares são direcionados para o Norte Geográfico (quando instalados no hemisfério Sul como no caso do Brasil). A instalação pode ser realizada dentro de uma faixa de tolerância da direção. A Figura 6 explicita os critérios apresentados (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011).

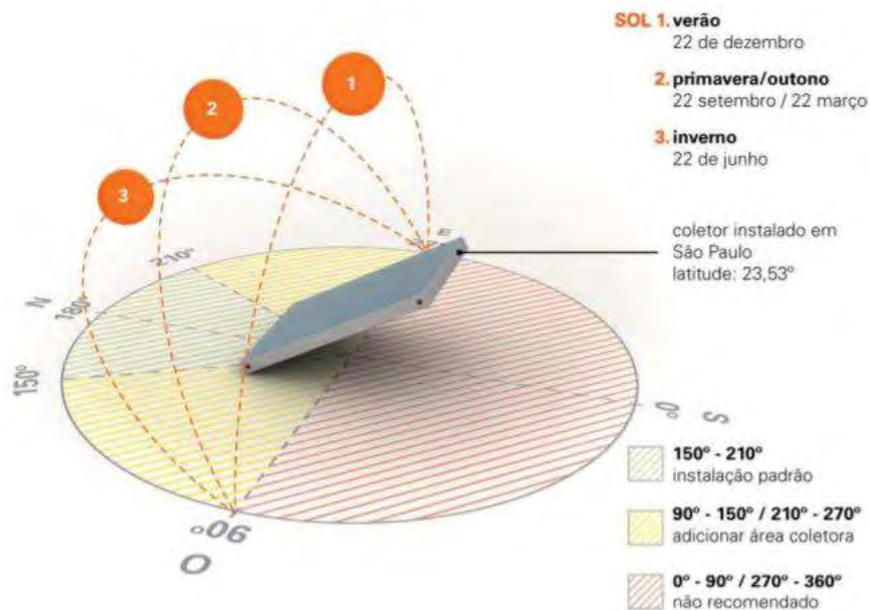


Figura 6. Trajetória do sol e desvio do Norte geográfico (ângulos azimutais de superfície)
(COMGÁS; ABRINSTAL, 2011)

2.1.4 Associação de coletores

Os coletores solares devem ser instalados, e interligados entre si, conforme orientação do fabricante, devendo ser verificado o sentido do fluxo da água e a configuração do sistema.

Como princípio básico de interligação dos coletores, pode-se resumir as associações em: paralelo, em série ou misto, conforme a Figura 7.

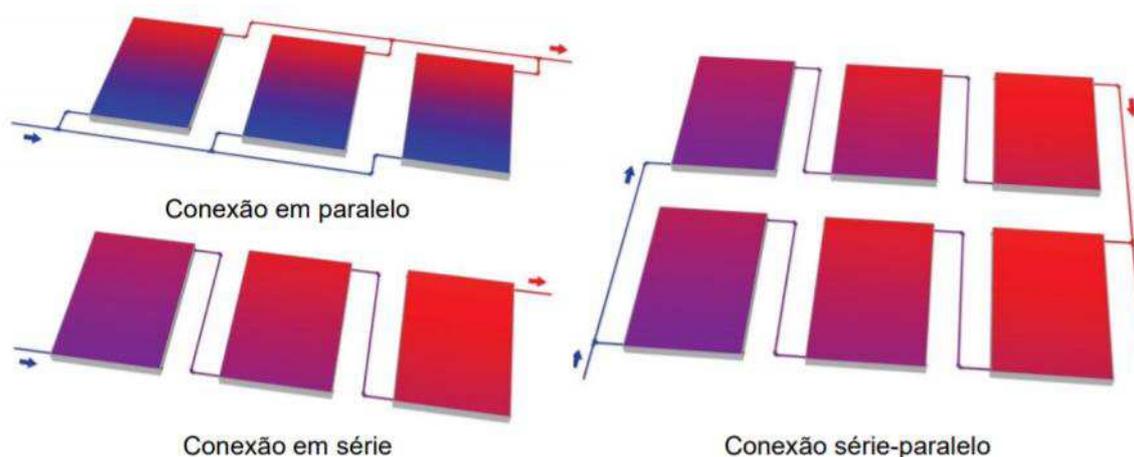


Figura 7. Esquema de associação de coletores (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011)

As ligações em série permitem que um determinado volume de água obtenha uma maior temperatura de água em função do maior tempo de percurso dentro dos coletores. Contudo, temperaturas elevadas tendem a reduzir a eficiência de troca de calor, entre a água e o coletor. Dessa forma, evitam-se muitos coletores ligados em série mesclando o sistema com fileiras de coletores em paralelo.

O critério para a seleção dos coletores em série e paralelo são muito divergentes conforme a referência a ser utilizada. Essa divergência normalmente ocorre vinculada às diferenças das características específicas dos coletores solares ou dos sistemas de circulação adotados (características das bombas de circulação).

Recomenda-se a consulta aos fabricantes de coletores solares para identificação da associação mais eficiente (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011).

2.1.5 Sistema de armazenamento

O armazenamento de energia captada, quando necessário, em função da não simultaneidade entre consumo e disponibilidade de energia solar, é feito através do armazenamento de água em reservatório(s) apropriado(s) e se manifesta pela elevação da temperatura da água armazenada (ABNT NBR 15569, 2008).

O sistema de aquecimento de água por meio da energia solar define-se como um sistema de acumulação, ou seja, ele deve armazenar água aquecida durante o período em que não há insolação disponível, para atender a demanda nos momentos em que esta supera a capacidade de aquecimento por esta fonte de calor.

O reservatório do sistema de aquecimento solar deve responder, no mínimo, às exigências impostas a todos os reservatórios de água quente. Entretanto, esses reservatórios distinguem-se pela temperatura elevada que a água pode alcançar em seu interior.

O Centre Scientifique et Technique de la Construction - CSTC (1999), recomenda a utilização de um reservatório vertical de uma altura que equivale a 2 a 2,5 vezes o seu diâmetro a fim de assegurar uma boa estratificação da água pré-aquecida. Com a estratificação, a água mais quente se acumula na parte de cima do reservatório, enquanto que a água fria se situa na parte inferior deste. Nos reservatórios horizontais, este efeito de estratificação é bem menor, de modo que o rendimento global do aquecedor pode ser prejudicado.

Para a fabricação dos reservatórios, utiliza-se, preferencialmente, aço inoxidável. No entanto, o cobre e o aço esmaltado com ânodo de proteção também podem ser utilizados. Os reservatórios de aço galvanizado são desaconselhados por oferecerem resistência insuficiente à corrosão, enquanto que os de material sintético podem ser usados apenas quando água é armazenada sem pressão.

Outro importante ponto a ser observado é a qualidade do isolamento térmico que reveste o reservatório. Ela deve ser projetada de modo que as perdas de calor para o meio sejam as menores possíveis (TADEU; BERNARDES; MENEZES; MONTORO; YUKARI; OLIVEIRA, 2007).

2.1.6 Sistema de aquecimento auxiliar

Quando aplicável, deve ser previsto sistema de aquecimento auxiliar para complementar a demanda energética para o perfil de consumo previsto.

2.1.7 Sistema de aquecimento solar em circuito indireto

Em uma configuração de circuito indireto, conceitualmente apresentada na Figura 8, o fluido aquecido pelo sistema solar não é o que será consumido; ele circula um sistema fechado (sistema primário) e transfere o calor para trocadores de calor (placas ou reservatórios térmicos) nas unidades autônomas. A água que será consumida (circuito secundário) é medida em conjunto com o restante da água fria e será aquecida ao passar pelo trocador de calor no qual circula a água aquecida pelo sistema solar.

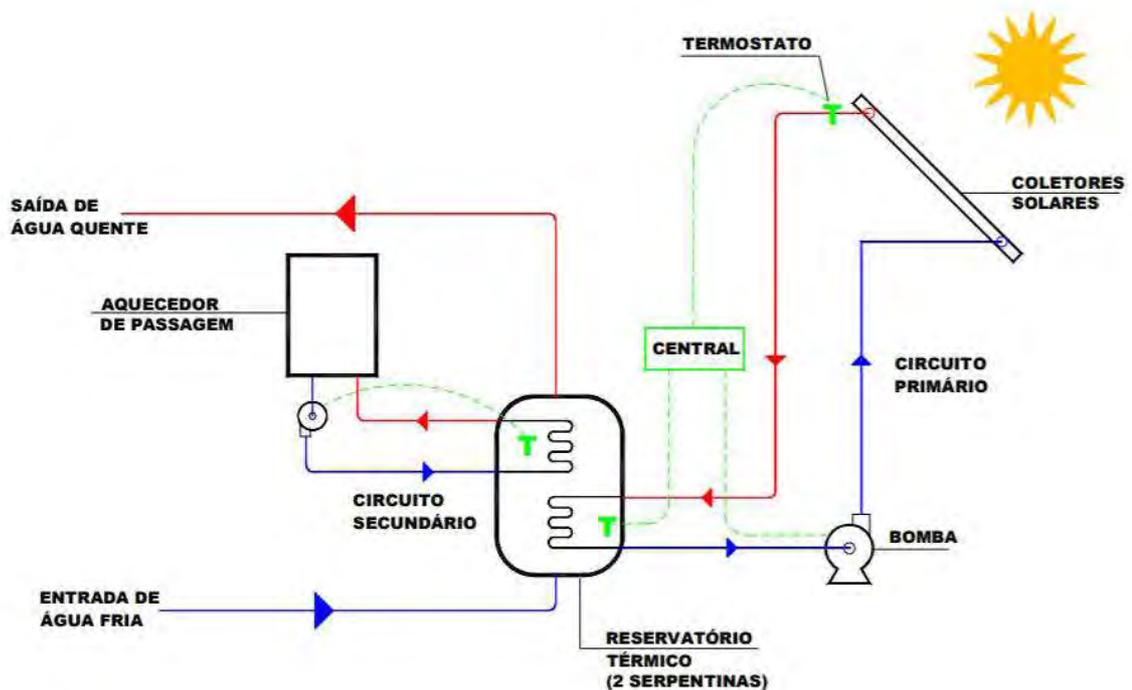


Figura 8. Esquema de aquecimento solar em circuito indireto, com fonte complementar de calor e reservatório térmico (FARINA, 2009)

A regulagem da temperatura é efetuada por válvulas de três vias ou misturadoras na saída do equipamento. O complemento da energia poderá ser realizado através de uma fonte centralizada ou individualizada.

Esta solução é largamente aplicada na Europa e apresenta algumas vantagens sobre o sistema em circuito direto:

- O circuito primário (conforme Figura 8) tem um limite maior de pressão de operação (cerca de 1000 kPa), pois não abastecem diretamente os pontos de consumo. Isso faz com seja dispensado, na maioria dos casos, as válvulas redutoras de pressão, o que evita aparatos para que as linhas de recirculação tenham eficiência no sistema em alta pressão;

- O circuito primário (conforme Figura 8) permite o uso de aditivos, tais como o glicol para evitar o congelamento das linhas de aquecimento, preservando os coletores de esforços promovidos pelas variações de temperatura;

- Os volumes de água reservados são dimensionados para o armazenamento de energia (reservatórios térmicos) que se requer para o suprimento de calor às unidades e não para consumo direto, o que resulta em menores volumes de armazenamento.

O controle de sobreaquecimento nos pontos de consumo é garantido pelos equipamentos empregados no sistema indireto. O circuito primário ligado com água quente proveniente dos coletores solares transfere calor ao reservatório térmico por meio da serpentina inferior. Se a água atingir a temperatura pré-estabelecida ou superior, não há o acionamento do aquecedor de passagem ligado à segunda serpentina localizada na parte superior do reservatório. Por outro lado, caso o sistema solar não proporcione o aquecimento necessário, o aquecedor de passagem é acionado, complementando a temperatura da água, pela transferência de calor pela serpentina superior. Nesta situação, tem-se a redução ou até a dispensa da reserva de água junto aos coletores solares, ficando apenas junto à unidade consumidora, o que requer mais espaço para a sua instalação. Além disso, o sistema de energia complementar pode ser totalmente individualizado.

Outra opção é o emprego de um trocador de calor no lugar ao invés do reservatório térmico. Nesse caso, instala-se nas unidades apenas o trocador de calor, sendo a reserva de energia no tanque inercial junto aos coletores solares, podendo ou não trabalhar também aqui com trocadores de calor de placas. Na unidade, a água de saída do trocador de calor pode ter ou não a temperatura complementada pelo aquecedor de passagem, pela instalação de uma válvula de três vias regulada para uma temperatura mínima (FARINA, 2009).

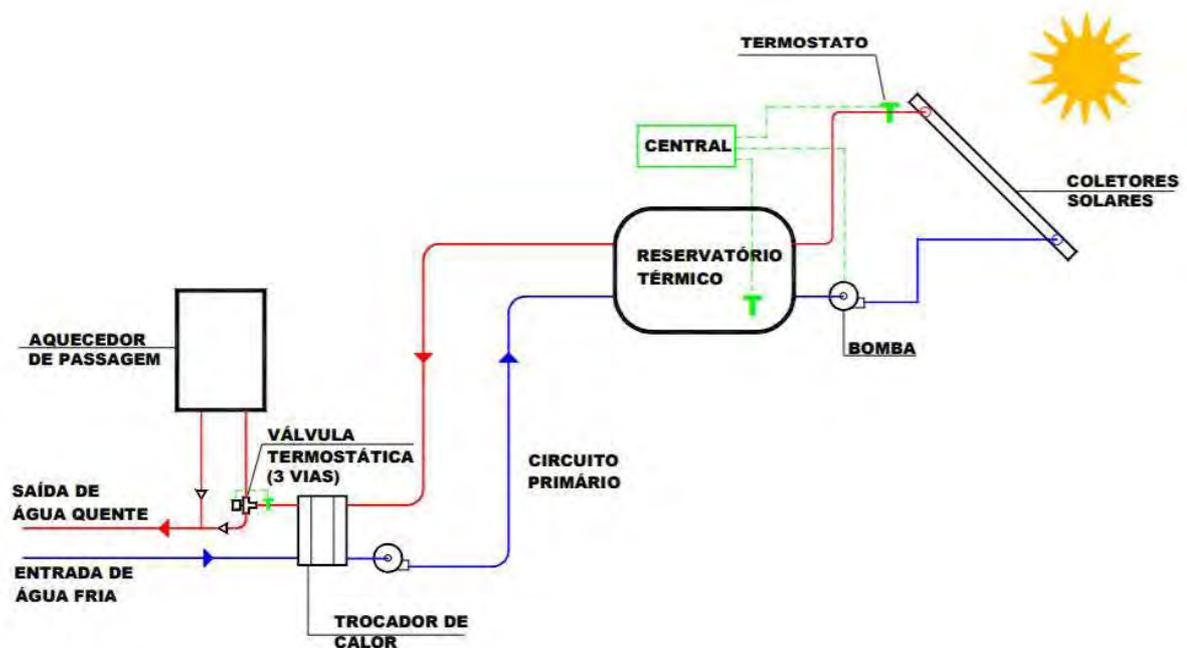


Figura 9. Esquema de aquecimento solar em circuito indireto, com fonte complementar de calor e trocador de calor de placas (FARINA, 2009)

Os trocadores de calor são equipamentos que promovem a troca de calor entre dois fluídos sem que estes se misturem. Para isto existem diversos modelos, podendo ser do tipo placa, serpentina, ou camisa apresentados na Figura 10, Figura 11 e Figura 12, respectivamente.

A utilização de trocadores de calor nos sistemas de aquecimento solar instalados, entre os coletores solares e o reservatório, ou o sistema de distribuição: permite que o circuito do sistema de aquecimento solar utilize líquidos com aditivos de forma a minimizar efeitos de corrosão e deposição de sólidos, assim como reduzir os efeitos de congelamento e a proliferação de bactérias. São geralmente utilizados com o intuito de aumentar a vida útil dos coletores solares (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011).



Figura 10. Trocaador de calor do tipo placa (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011)

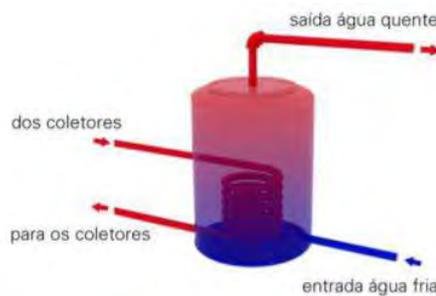


Figura 11. Trocaador de calor do tipo serpentina (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011)

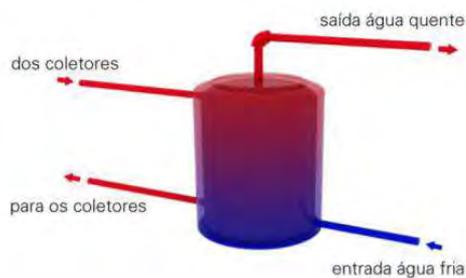


Figura 12. Trocaador de calor do tipo camisa (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011)

2.1.8 Sistemas de controle

Sistemas de controle são essenciais para otimizar o funcionamento dos sistemas de aquecimento solar, de forma a permitir um melhor aproveitamento da radiação solar e da redução das perdas térmicas do sistema.

O sistema mais simples utilizado, considerado como básico em qualquer instalação de sistema de aquecimento solar com circulação forçada, é o de monitoramento da temperatura diferencial entre os coletores solares e o reservatório térmico, conforme apresentado na Figura 13.

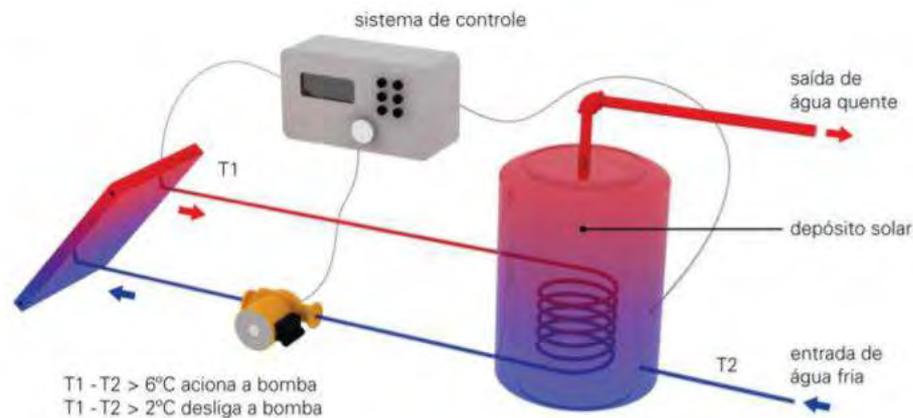


Figura 13. Esquema simplificado de controle de temperatura diferencial (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011)

Nesta configuração, quando a temperatura do coletor possui uma determinada temperatura acima da temperatura do reservatório, a bomba de recirculação é acionada e transporta o fluido dos coletores para dentro do reservatório, caso contrário o sistema é desligado. Alguns valores podem ser adotados com relação à diferença de temperatura de acionamento, que a bomba é acionada com 6°C de diferencial e desligada com 2°C . Essa função evita a ocorrência de resfriamento da água armazenada nos coletores quando estes estão com temperatura mais baixa.

Pode-se utilizar válvulas anticongelamento (geralmente nos trechos mais baixos dos sistemas de circulação), além do acionamento para o aquecimento do reservatório, para evitar o congelamento em dias com baixa temperatura, através da circulação de água nos coletores.

Também podem ser utilizadas válvulas misturadoras na saída de água quente do reservatório ou na entrada de cada unidade habitacional, de forma a controlar a temperatura máxima na rede de água quente.

Os principais tipos de sistemas de controle que podem ser utilizados são os seguintes:

- Alerta de mau funcionamento
- Aquecimento seco (quando o tanque está sem água)
- Aviso de falha no sistema
- Configuração de temperatura e aquecimento
- Controle de temperatura
- Controle de vazão variável (para suprir demanda de diferentes pontos de consumo simultaneamente, sem flutuação)
- Controle eletrônico de temperatura
- Controle remoto de temperatura (permite ajustar a temperatura ideal para diferentes pontos de consumo)
- Desligamento automático em caso de super aquecimento
- Painel de controle com funções de acionamento e desligamento automático
- Proteção contra super aquecimento
- Válvula de fechamento automático do gás

Além do sistema de monitoramento dos coletores há aplicações de sistemas de controle para monitorar a alimentação de água quente nos apartamentos de forma otimizada, ou o gerenciamento das temperaturas dos reservatórios em função da demanda de água quente (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011).

2.1.9 Rendimento

A eficiência dos coletores é variável em função das condições climáticas do local, possuindo um comportamento característico para cada coletor, principalmente em função da diferença de temperatura entre a água na entrada e na saída do coletor.

Dessa forma a definição da melhor placa para determinadas aplicações deve ser feita em função das curvas de eficiência, que podem ser obtidas com os dados fornecidos pela Tabela de Eficiência dos coletores solares do INMETRO.

Para exemplificar, a Figura 14 apresenta um gráfico comparativo de rendimentos entre os coletores planos com cobertura e sem cobertura, e coletores a vácuo (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011).

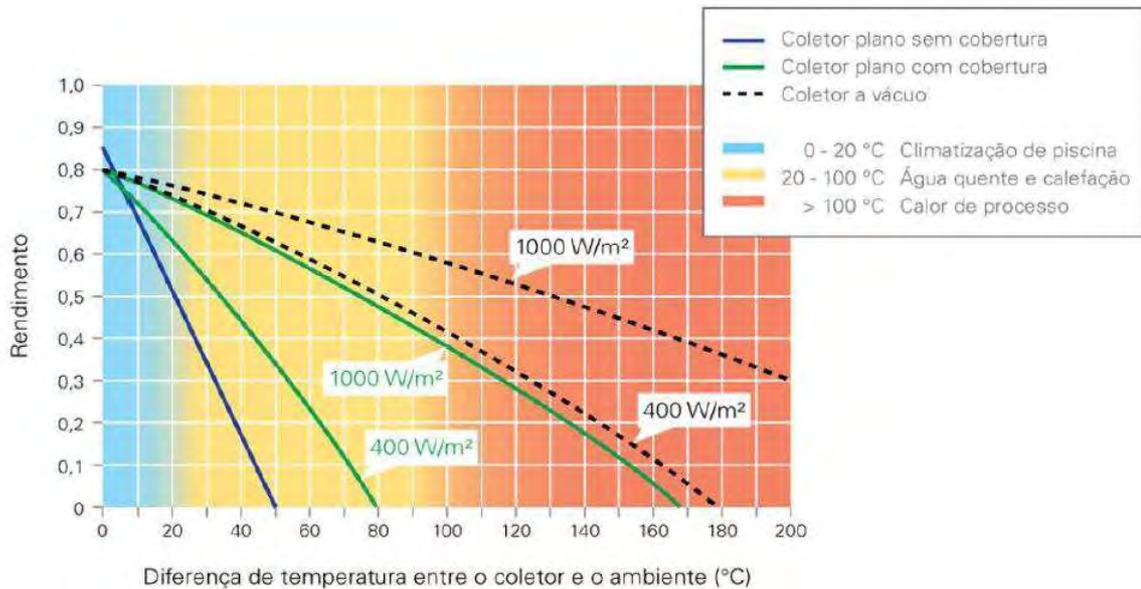


Figura 14. Rendimento de diversos tipos de coletores frente a diferença de temperatura entre o coletor e o ambiente (COMGÁS; ABRINSTAL, 2011)

2.1.10 Análise energética do rendimento

A energia total de irradiação que incide no coletor é dada por:

$$Q_c = A_p G_T \quad (1)$$

A radiação absorvida em um coletor plano é igual à diferença entre o fluxo de energia solar incidente (G_T) e as perdas térmicas e ópticas existentes, por unidade de área. A energia térmica perdida para a vizinhança por condução, convecção e radiação, segundo Duffie e Beckman (1991), pode ser representada pelo produto do coeficiente global de transferência de calor (U_L) pela diferença entre a temperatura média do absorvedor (T_{ma}) e a temperatura ambiente (T_{amb}), portanto o fluxo de energia útil (Q_u) em um dado instante é:

$$Q_{uc} = A_{ab}[G_T(\tau\alpha)_e - U_L(T_{ma} - T_{amb})] \quad (2)$$

Onde:

A_{ab} : é a área do absorvedor do coletor, e;

$(\tau\alpha)_e$: são a transmitância e a absorptância efetivas.

A temperatura média do absorvedor é influenciada pela geometria, pelas propriedades dos materiais empregados, pela radiação solar incidente e pelo fluido de entrada, o que torna difícil sua obtenção, tanto analiticamente como experimentalmente. Desse modo, a energia útil é usualmente expressa nos termos da temperatura do fluido:

$$Q_{uc} = A_p Fr [G_T(\tau\alpha)_e - U_L(T_e - T_{amb})] \quad (3)$$

Onde:

T_e : é a temperatura do fluido na entrada do coletor;

Fr : é o fator de remoção de calor, equivale à eficiência, definido como a relação entre a quantidade real de calor absorvida e a máxima quantidade de calor possível que pode ser transferido.

Devido à cobertura de vidro, o ângulo de incidência (θ) solar depende da transmitância e da absorptância. O coeficiente de correção devido ao ângulo de incidência ($K_{\tau\alpha}$) é definido pela ASHRAE (1996) como sendo a relação entre o valor de $(\tau\alpha)_e$ para um ângulo θ qualquer e o valor de $(\tau\alpha)_n$ para a radiação normal ao coletor. Esta relação é encontrada experimentalmente através da determinação do coeficiente b_0 da equação (ABNT, 1988a; ASHRAE, 1996, apud ARRUDA, 2004, apud TADEU; BERNARDES; MENEZES; MONTORO; YUKARI; OLIVEIRA, 2007):

$$K_{\tau\alpha} = \frac{(\tau\alpha)_e}{(\tau\alpha)_n} = 1 + b_0 \left[\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right] \quad (4)$$

A energia transferida ao coletor é máxima quando todo este está à temperatura local do ambiente, pois, nesta situação, as perdas de calor para o ambiente são as menores possíveis. Como o coletor se aquece durante o processo, o fator de remoção de calor é na realidade menor. O fator de eficiência do coletor (F') é a razão entre a energia real transferida para a água e a

energia útil que resultaria se o absorvedor estivesse à temperatura local do ambiente. Duffie e Beckman (1991) demonstram que este fator também é definido pela relação entre o coeficiente global de transferência de calor da água para o ar (U_0) e o coeficiente global de perda de calor do coletor (U_L) e apresentam as seguintes relações:

$$F' = \frac{U_0}{U_L} \quad (5)$$

$$Fr = \frac{\dot{m}Cp}{A_p U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}Cp}\right) \right] \quad (6)$$

A determinação de F' a partir dos dados de Fr obtidos de um ensaio em regime quase permanente é obtido na Equação 7.

$$F' = -\frac{\dot{m}Cp}{A_p U_L} \left[\ln\left(1 - \frac{Fr U_L A_p}{\dot{m}Cp}\right) \right] \quad (7)$$

A energia útil ou disponível no coletor também pode ser determinada pelo ganho de temperatura do fluido entre a entrada (T_e) e a saída (T_s):

$$Q_u = \dot{m}Cp(T_s - T_e) \quad (8)$$

Onde:

\dot{m} é a vazão em massa;

Cp é o calor específico do fluido a pressão constante;

A eficiência térmica do coletor é definida como a razão entre o ganho útil de energia durante um período de tempo e a energia solar incidente neste período:

$$Ef_t = \frac{\int Q_u \cdot dt}{A_p \int G_T \cdot dt} \quad (9)$$

O rendimento instantâneo é dada em função das temperaturas e pode ser obtida dividindo ambos os lados da equação por $G_T \cdot A_c$:

$$\eta_c = Fr.(\tau\alpha)_e - Fr.U_L \cdot \left(\frac{T_e - T_{amb}}{G_T} \right) \quad (10)$$

A temperatura T_e pode ser tomada como a temperatura de entrada ou a de saída do fluido, ou a média entre elas (ARRUDA, 2004, apud TADEU; BERNARDES; MENEZES; MONTORO; YUKARI; OLIVEIRA, 2007). Na Figura 14, verifica-se que a temperatura T_e pode ser tomada também como a temperatura da superfície do coletor.

Dessa forma fica evidente que uma das formas de aumentar a eficiência do coletor é fazer com que a temperatura do coletor se iguale a temperatura ambiente. Reforçando, assim, a necessidade da sua análise.

2.1.11 Análise exérgica do rendimento

Exergia é definida como a máxima quantidade de trabalho que pode ser produzido por um sistema ou um fluxo de matéria ou energia à medida que se equilibra com um ambiente de referência (KOTAS, 1995, apud FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009). A forma geral da equação de balanço exérgico é (SUZUKI, 1988, apud FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009):

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_s + \dot{E}_{out} + \dot{E}_l + \dot{E}_d = 0 \quad (11)$$

Onde \dot{E}_{in} , \dot{E}_s , \dot{E}_{out} , \dot{E}_l e \dot{E}_d são as taxas de exergia de entrada, armazenamento, saída, vazamento e a taxa de exergia destruída, respectivamente.

A taxa exérgica de entrada inclui a taxa exérgica de entrada com fluxo de fluido e a taxa exérgica da radiação solar absorvida. A taxa de exergia de entrada com fluxo de fluido é dada por (BEJAN 1988; KOTAS, 1995, apud FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009):

$$\dot{E}_{e,f} = \dot{m}Cp \left(T_e - T_{amb} - T_{amb} \ln \left(\frac{T_e}{T_{amb}} \right) \right) + \frac{\dot{m}\Delta P_e}{\rho} \quad (12)$$

A taxa de exergia da radiação solar absorvida, considerando o teorema de Petela, é dada por (PETELA, 1964, apud FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009):

$$\dot{E}_{e,Q} = \eta_0 G_T A_p \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right)^4 \right] \quad (13)$$

O termo entre colchetes é a eficiência de Petela (hp). No entanto, esta equação viola a segunda lei da termodinâmica para tais sistemas (NAJIAN, 2000, apud FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009). A equação corrigida, assumindo o sol como uma fonte térmica infinita, é (TORRES-REYES; CERVANTES DE GORTARI; IBARRA-SALAZAR; PICON-NUNEZ, 2001; NAJIAN, 2000, apud FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009):

$$\dot{E}_{e,Q} = \eta_0 G_T A_p \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right) \quad (14)$$

Onde T_{sol} é a temperatura aparente do sol e equivale a 75% da temperatura do corpo negro do sol (BEJAN, 1981, apud FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009). A soma da Equação 12 e com a Equação 14 resultará em taxa de exergia total de entrada do coletor solar.

A taxa de exergia armazenada é nula em condições estáveis.

A taxa de exergia de saída inclui apenas a taxa de exergia do fluxo de fluido de saída (BEJAN, 1988; KOTAS, 1995, apud FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009):

$$\dot{E}_{s,f} = -\dot{m} C_p \left(T_s - T_{amb} \ln \left(\frac{T_s}{T_{amb}} \right) \right) - \frac{\dot{m} \Delta P_s}{\rho} \quad (15)$$

Na Equação 12 e na Equação 15, ΔP_e e ΔP_s são a diferença de pressão do fluido agente com entorno na entrada e saída do coletor solar.

A taxa de exergia de vazamento causada pela taxa de vazamento de calor da placa absorvedora para o meio ambiente é (DUTTA GUPTA; SAHA, 1990, apud FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009):

$$\dot{E}_v = -U_L A_p (T_{mp} - T_{amb}) \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{mp}} \right) \quad (16)$$

A taxa de exergia destruída inclui três termos; um é causado pela diferença de temperatura entre a superfície da placa de absorção e o sol (DUTTA GUPTA; SAHA, 1990, apud FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009):

$$\dot{E}_{d,\Delta T_s} = -\eta_0 G_T A_p T_{amb} \left(\frac{1}{T_{mp}} - \frac{1}{T_{sol}} \right) \quad (17)$$

O segundo termo é causado pela queda de pressão dos dutos (SUZUKI, 1988, apud FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009):

$$\dot{E}_{d,\Delta P} = -\frac{\dot{m}\Delta P T_{amb} \ln\left(\frac{T_s}{T_{amb}}\right)}{\rho (T_s - T_e)} \quad (18)$$

E o terceiro termo é causado pela diferença de temperatura entre a superfície da placa de absorção e o agente fluido que é dado por (SUZUKI, 1988, apud FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009):

$$\dot{E}_{d,\Delta T_F} = -\dot{m} C_p T_{amb} \left(\ln\left(\frac{T_s}{T_e}\right) - \frac{(T_s - T_e)}{T_{mp}} \right) \quad (19)$$

A eficiência exergética do coletor solar define o aumento da exergia do fluxo de fluido sobre a exergia da radiação primária pela fonte de radiação. Substituindo as Equações 12 a 19 na Equação 11 e considerando a definição de eficiência exergética, deriva-se da segunda lei do coletor solar a equação de eficiência (DUTTA GUIPTA; SAHA, 1990; NAJIAN, 2000; LUMINOSU; FARA, 2005, apud FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009):

$$\begin{aligned}
\eta_{ex} &= \frac{\dot{m} \left\{ C_p \left[T_s - T_e - T_{amb} \ln \left(\frac{T_s}{T_e} \right) \right] - \frac{\Delta P}{\rho} \right\}}{G_T A_p \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right)} \\
&= 1 \\
&\quad - \left\{ (1 - \eta_0) + \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho G_T A_p \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right)} \frac{T_{amb} \ln \left(\frac{T_s}{T_{amb}} \right)}{(T_s - T_e)} \right. \\
&\quad + \frac{\eta_0 T_{amb}}{\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right)} \left(\frac{1}{T_{mp}} - \frac{1}{T_{sol}} \right) + \frac{U_L (T_{mp} - T_{amb})}{G_T \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right)} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{mp}} \right) \\
&\quad \left. + \frac{\dot{m} C_p T_{amb} \left[\ln \left(\frac{T_s}{T_e} \right) - \frac{(T_s - T_e)}{T_{mp}} \right]}{G_T A_p \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right)} \right\}
\end{aligned} \tag{20}$$

Os termos do lado direito da Equação 20 indicam a perda de exergia evidenciando que o estudo das temperaturas de entrada e de saída também são importantes para a eficiência do coletor (FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009).

Ainda além, Farahat, Sarhaddi e Ajam trazem o resultado de sua simulação na Figura 15, na qual simulam como a eficiência exérgica varia de acordo com a área coletora e a vazão do sistema.

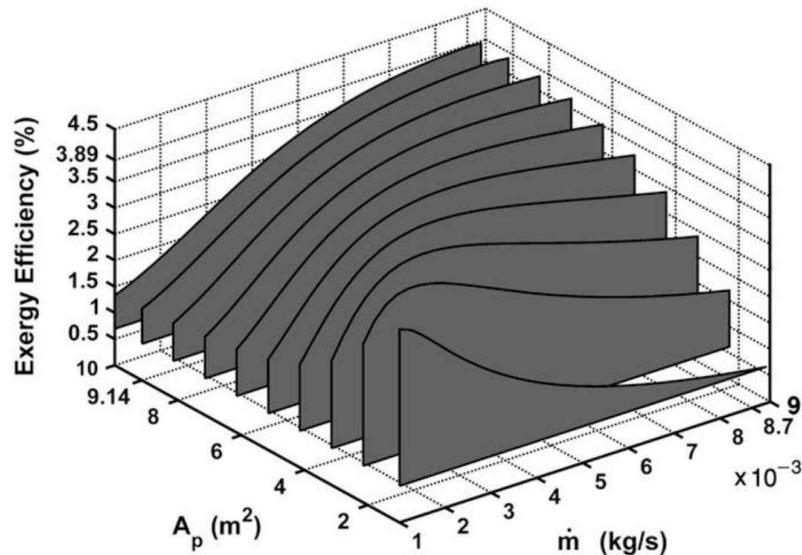


Figura 15. Eficiência exérgica em função da área dos coletores e da vazão do sistema (FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009)

Percebe-se, portanto, uma relação direta entre a vazão e a eficiência de um coletor e que existe uma vazão. Dessa forma é de se esperar que seja possível realizar um aumento de eficiência nos coletores solares a partir do controle da vazão de acordo com as temperaturas de entrada, de saída e do próprio coletor.

2.2 Painel solar fotovoltaico

As células fotovoltaicas são constituídas por um material semicondutor – o silício – ao qual são adicionadas substâncias, ditas dopantes, de modo a criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico, isto é, conversão direta da potência associada à radiação solar em potência eléctrica DC (CASTRO, 2002).

O material mais utilizado para essa função é o Silício. Mais recentemente foram fabricadas células com outros materiais tais como Arsenieto de Gálio e Sulfeto de Cádmiio.

Os painéis de silício amorfo (a-Si) apresentam um rendimento de aproximadamente 9% e os painéis de silício cristalino (c-Si) rendimento entre 10% e 13%, porém os painéis de a-Si têm um custo de fabricação menor. O rendimento de um painel, sendo este composto por várias células é sempre menor do que o rendimento de uma célula (DEMONTI, 1998).

A célula é o menor elemento do sistema fotovoltaico, produzindo tipicamente potências eléctricas da ordem de 1,5 W (correspondentes a uma tensão de 0,5 V e uma corrente de 3 A). Para obter potências maiores, as células são ligadas em série e/ou em paralelo, formando módulos (tipicamente com potências da ordem de 50 a 100 W) e painéis fotovoltaicos (com potências superiores) (CASTRO, 2002). A Figura 16 apresenta o esquema simplificado de uma célula fotovoltaica.

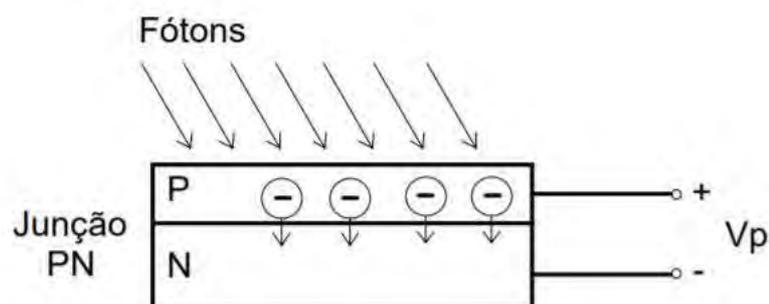


Figura 16. Esquema simplificado de uma célula fotovoltaica (DEMONTI, 1998)

2.2.1 Efeito da irradiância solar

Com a variação da intensidade da radiação solar incidente em um painel fotovoltaico ocorre uma variação proporcional na corrente gerada por este painel. A tensão no circuito sofre poucas alterações com a variação da intensidade luminosa, exceto para os casos quando a radiação solar é muito baixa. Assim, com a diminuição da radiação incidente ocorre um deslocamento para baixo do ponto de máxima potência. Um exemplo de curvas I-V para várias densidades de potência luminosa incidente é mostrado na Figura 17 enquanto um exemplo de curvas P-V para várias densidades de potência luminosa incidente é mostrado na Figura 18 (LÓPEZ, 2009).

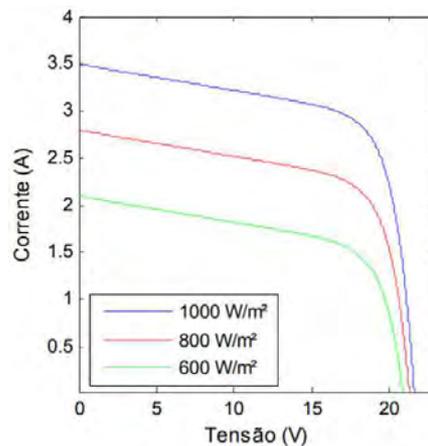


Figura 17. Curva de corrente x tensão de um painel fotovoltaico para diferentes potências luminosas (LÓPEZ, 2009)

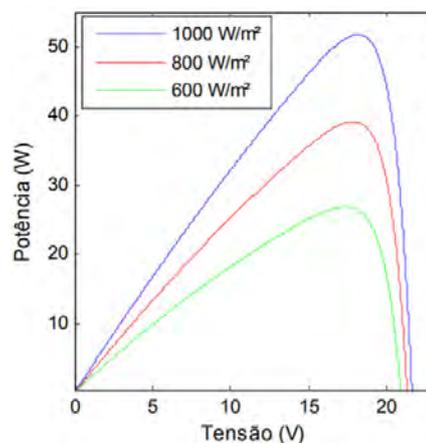


Figura 18. Curva de potência x tensão de um painel fotovoltaico para diferentes potências luminosas (LÓPEZ, 2009)

2.2.2 Efeito da temperatura

Ao contrário do caso anterior, a corrente gerada pelo módulo fotovoltaico apresenta poucas variações com a alteração da temperatura da célula fotovoltaica, porém, com o aumento da temperatura da célula, a tensão de circuito do módulo fotovoltaico apresenta uma diminuição em seus valores muito mais significativa, em consequência com o aumento da temperatura, além de ocorrer um deslocamento para baixo do ponto de máxima potência, este também é deslocado significativamente para esquerda. Um exemplo de curvas I-V para várias temperaturas do painel é mostrado na Figura 19, quanto um exemplo de curva P-V para várias temperaturas do painel é apresentado na Figura 20 (LÓPEZ, 2009).

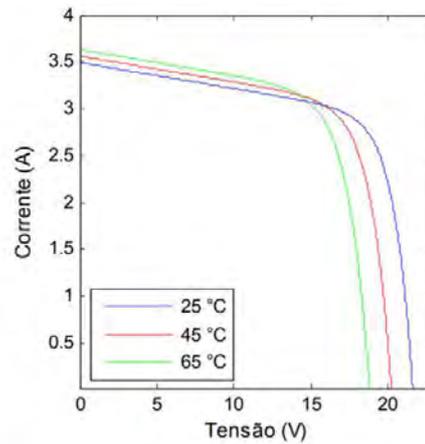


Figura 19. Curva de corrente x tensão de um painel fotovoltaico para diferentes temperaturas (LÓPEZ, 2009)

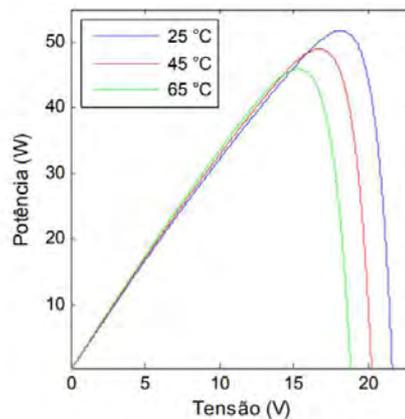


Figura 20. Curva de potência x tensão de um painel fotovoltaico para diferentes temperaturas (LÓPEZ, 2009)

A temperatura das células fotovoltaicas não é a mesma do ambiente, pois as células sofrem um aumento de temperatura ao receber a radiação solar, por conta do efeito fotovoltaico. A diferença de temperatura varia de acordo às características construtivas da célula (a-Si, p-Si, m-Si, etc.) e do módulo. Podemos estimar essa diferença de temperatura através da seguinte equação:

$$\Delta T = 0,034G_T - 4 \quad (21)$$

Nas folhas de dados dos fabricantes encontramos os coeficientes de temperatura, pois esse dado é de extrema importância, principalmente para o cálculo de eficiência, Equação 22, de sistemas conectados à rede, pois esses, geralmente, utilizam grandes quantidades de módulos associados em série, e as tensões são altas. Com a variação da temperatura a diferença de tensão pode não ser suficiente para o trabalho de um inversor on-grid durante os dias quentes de verão, mas pode alcançar valores capazes de danificar um inversor subdimensionado em um dia frio de inverno (BLUESOL, 2014).

$$E_{fe} = E_{fe,STC} * [100 + C_{TPm\acute{a}x}(T_{pm} - T_{STC})] \quad (22)$$

2.3 Coletor solar híbrido

Um sistema híbrido, também chamado de Photovoltaic and Thermal (PVT), é visto como uma tecnologia que engloba duas diferentes funções em apenas um equipamento. Um sistema PVT é uma combinação de componentes que convertem parte da energia proveniente do Sol em eletricidade, e parte em calor que aquece um fluido de trabalho.

Um módulo fotovoltaico converte entre 4 e 17% da radiação solar incidente em energia elétrica (LISBOA, 2010, apud CARDOSO, 2016). Isto significa que, além das perdas por reflexão, mais de 50% da radiação é perdida em forma de calor para a célula, o que pode levar a altas temperaturas de operação do módulo. Como consequência, a célula perde aproximadamente 0,4% de eficiência para cada °C acima de sua temperatura máxima de operação. Além disso, as altas temperaturas podem causar danos permanentes na estrutura das células se a tensão causada pelo calor permanecer por longos períodos (CHOW, 2010, apud CARDOSO, 2016).

Os primeiros estudos sobre a tecnologia PVT foram documentados no começo da década de 1970, onde pesquisadores apresentaram a ideia do uso de água ou ar como o fluido de resfriamento de painéis fotovoltaicos (CHOW, 2010, apud CARDOSO, 2016).

Bhargava, Garg e sua equipe de trabalho desenvolveram estudos analíticos e experimentais detalhados em sistemas híbridos PVT com ar e outros fluidos do final da década de 1980 até o final da década de 1990. Nestes estudos, concluiu-se que, em termos de performance total, coletores com dois vidros de isolamento são melhores que os de apenas um vidro, apesar de serem mais caros (BHARGAVA; GARG; AGARWAL, 1991; CHOW, 2010, apud CARDOSO, 2016).

Bergene e Lovvik em 1995 propuseram um modelo detalhado de um coletor PVT com água para avaliação de performance. Neste estudo, a eficiência total do sistema ficou entre 60% e 80%. Além disso, em seus estudos foi mostrado que fatores como a quantidade de água no tanque de armazenamento influencia a temperatura final da água, já que para tanques muito grandes a água não chegava à temperaturas altas como em tanques menores (BERGENE; LØVVIK, 1995; CHOW, 2010, apud CARDOSO, 2016).

Chow, em seu estudo, citou testes realizados em Riyadh na Arábia Saudita em 1998, que mostraram que as altas temperaturas no verão podem levar a perdas de até 30% em eficiência elétrica em sistemas PVT, apesar da eficiência térmica ser boa. Neste mesmo estudo durante os meses de inverno, os módulos apresentaram boa performance elétrica, e em contrapartida, eficiências térmicas mais baixas (HARBI; EUGENIO; ZAHRANI, 1998; CHOW, 2010, apud CARDOSO, 2016).

Vê-se, pois, a importância do estudo do comportamento da água frente a um coletor híbrido, pois essa é responsável tanto pelo aumento de eficiência da energia fotovoltaica produzida, quanto é a fonte de geração da energia térmica. O trabalho em questão tem o intuito de observar o impacto da influência que a vazão de água tem, apenas, sobre a energia produzida.

3 Metodologia

3.1 Circuito

O circuito primário que foi estudado pode ser simplificado pela Figura 21 e corresponde a um circuito indireto com trocador de calor externo.

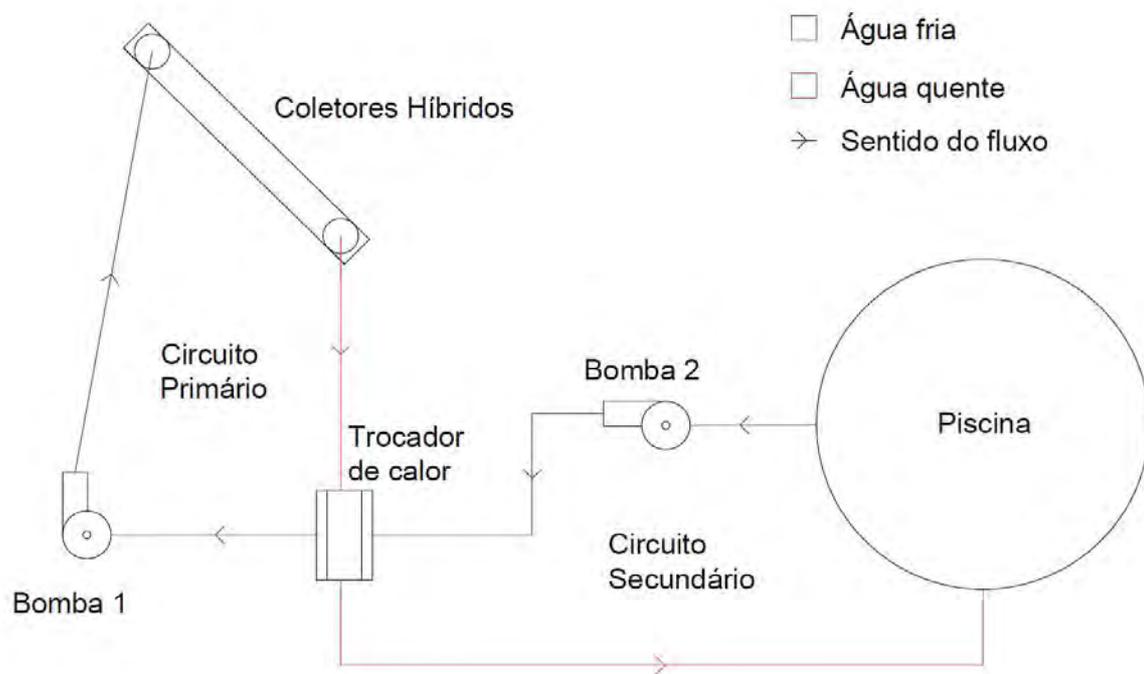


Figura 21. Esquema simplificado do circuito estudado

3.1.1 Especificação dos coletores solares híbridos

Os coletores solares híbridos utilizados são módulos fotovoltaicos Globo Brasil GBR260P, apresentado na Figura 22, que foram adaptados com um sistema de circulação de água pelos painéis, tornando seu funcionamento o mesmo de um coletor híbrido. Cada painel fotovoltaico possui as seguintes especificações:

- Célula: 60 Células - Policristalina - 156x156mm
- Tamanho: 1640 x 990 x 40mm
- Peso: 19kg

- Vidro: 3.2mm - Temperado - Baixo Teor de Ferro Prismático - Anti-Reflexo – Antisujidade
- Moldura: Alumínio Anodizado Fosco
- Caixa de Junção: Weidmüller - 3 Diodos - IP67 Cabos: TÜV 4mm² - 800mm
- Conectores: Weidmüller - Compatível MC4
- Filme de Proteção: Backsheets de alta durabilidade com filmes fluorados Kynar Film® by ARKEMA
- Potência máxima: 260W;
- Tensão de máxima potência: 30,24V;
- Corrente de máxima potência: 8,60A;
- Tensão de circuito aberto: 37,65V;
- Corrente de curto-circuito: 9,11A;
- Tensão máxima do sistema: 1000V
- Eficiência do módulo: 16,05%
- Coeficiente de temperatura da potência máxima: -0,43%/°C
- Coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto: -0,34%/°C
- Coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito: 0,065%/°C
- Temperatura nominal de funcionamento da célula: 45±2°C



Figura 22. Módulo fotovoltaico Globo Brasil GBR260P

O arranjo dos coletores estudado constitui de 7 coletores em série, ligados em paralelo com mais 7 coletores em série, possuindo um inclinação de 23° e um ângulo azimutal de 4° em relação ao norte, instalados numa latitude de 23,36°. A Figura 23 e a Figura 24 mostram o detalhamento técnico da instalação dos painéis híbridos.

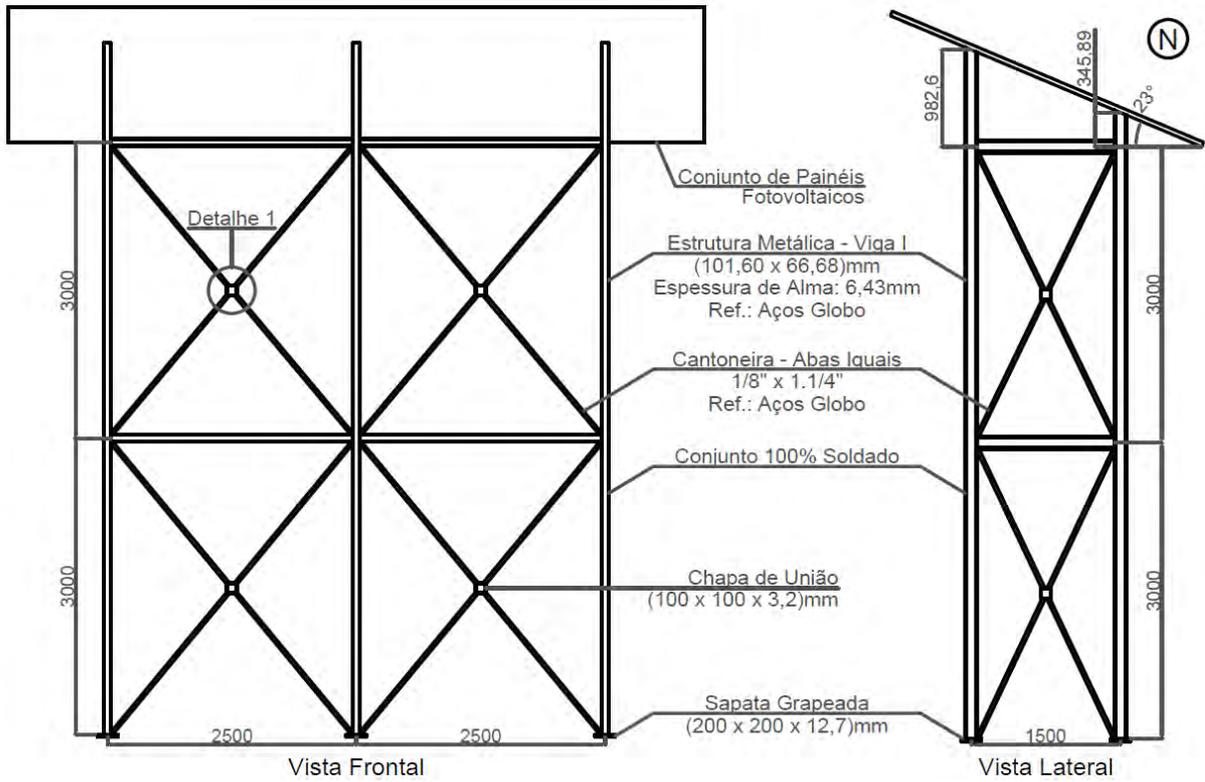


Figura 23. Detalhamento dos painéis híbridos, vistas frontal e lateral

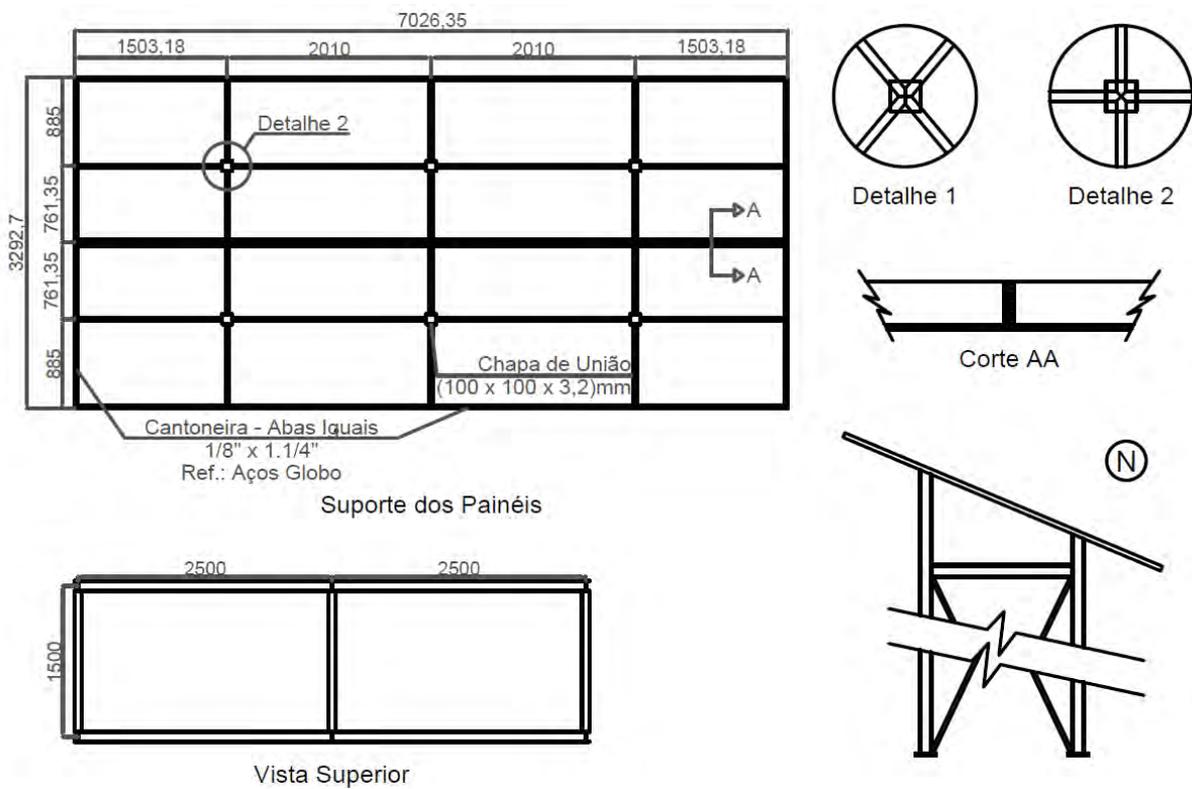


Figura 24. Detalhamento dos painéis híbridos, vista superior, suporte dos painéis e detalhes

3.1.2 Bombas

A bomba utilizada no circuito primário (bomba 1 da Figura 21) é a bomba periférica Amanco 98463, apresentada na Figura 25, que possui as seguintes especificações:

- Vazão máxima: 40 L/min;
- Altura máxima: 40 m;
- Sucção máxima: 8m;
- Entrada/Saída: 1”x1”;
- 1~Mot;
- Tensão: 220 V;
- Hz 60;
- 3400 min⁻¹;
- kW 0,37;
- HP 0,5;
- In 2,5 A;
- IP X4;
- C 8μF;
- VL 450V;
- I CL B;
- Serviço contínuo;
- Termicamente protegido.



Figura 25. Bomba periférica Amanco 98463

Já a bomba utilizada para o circuito secundário (bomba 2 da Figura 21) é a bomba Jacuzzi 5A-M, apresentada na Figura 26, que possui as seguintes especificações:

- Rotação nominal 3500 rpm;
- Monobloco com motor elétrico (60 hz);
- Bocais para tubulação de pvc colável.



Figura 26. Bomba Jacuzzi 5A-M

3.1.3 Trocador de calor

Foi utilizado um trocador de calor do tipo placa com dimensões de 350x150 mm, apresentado na Figura 27.



Figura 27. Trocador de calor do tipo placa utilizado

3.2 Equipamentos de medidas

Para execução do trabalho, foram necessários equipamentos de medição de vazão, de temperatura e de incidência solar.

O medidor de vazão utilizado foi o “Water Flow Sensor YF-S201”. Esse sensor fica alinhado com a sua linha de água e contém um sensor cata-vento para medir quanto de líquido passou por ele. Há um sensor de efeito hall magnético integrado que produz um pulso elétrico a cada revolução. O sensor de efeito hall é selado do tubo de água e permite que o sensor permaneça seguro e seco. Esse sensor trabalha com vazões de 1 a 30 L/min para pressões de água menores ou iguais a 1,75 MPa e foi instalado logo após o recalque da bomba do circuito primário (bomba 1 da Figura 21).



Figura 28. Medidor de vazão Water Flow Sensor YF-S201

Quatro sensores de temperatura foram instalados, sendo um na entrada dos coletores, um na saída dos coletores e dois sobre a superfície do painel, sendo o primeiro localizado perto da entrada de água e o segundo perto da saída de água.

Utilizou-se como medidor de incidência solar o solarímetro “Solar Survey 100/200R” que possui sensor de irradiância que pode ser mostrado em W/m^2 para fotovoltaicos ou em BTU/hr-ft^2 para aplicações térmicas, que possui acoplado sensor de temperatura, datalogger com timer para armazenar os dados a cada período especificado e certificado de calibração emitido pela Seaward Electronic.



Figura 29. Solarímetro Solar Survey 100/200R

Enquanto o solarímetro utilizado possui um datalogger integrado, os sensores de temperatura e vazão não. Dessa forma, foi necessário utilizar uma plataforma de prototipagem eletrônica Arduino para realizar a aquisição dos dados obtidos, com o programa implementado apresentado no Apêndice A.

3.3 Execução

Ao primeiro momento foram feitas as medições em campo de forma a obter os dados necessários sobre a vazão, a temperatura no coletor e a irradiância solar. Para obtenção dos dados, primeiramente posicionou-se o solarímetro em cima do coletor solar e foi ativada a função Datalogger de aquisição de dados. Nesse momento, anotou-se o horário de início de aquisição. Em sequência iniciou-se o processo de aquisição de dados de temperatura e de vazão pela plataforma de prototipagem eletrônica Arduino. Nesse momento, anota-se o horário de início de aquisição.

Como esse estudo tem como objetivo identificar como a vazão e a irradiância influenciam na eficiência do coletor solar, foi necessário variar a vazão em que o coletor trabalha. Utilizou-se, portanto, de um registro esfera e de um transformador de tensão 220Vx110V afim de reduzir a vazão do circuito primário. O registro tem a função de aumentar a perda de carga do circuito e conseqüentemente diminuir a vazão de operação, ao passo que o transformador tem a função de fazer a bomba do circuito primário (bomba 1 da Figura 21)

trabalhar em uma voltagem mais baixa, reduzindo sua rotação e diminuindo conseqüentemente a vazão do circuito.

O procedimento utilizado para aquisição de dados era, portanto, de escolher uma condição de vazão fixa e esperar tempo suficiente para que o circuito tenha entrado em regime permanente e para que fossem obtidas várias faixas de irradiância nesse período. Ao término dessa aquisição, repete-se esse procedimento o máximo de vezes possíveis ao longo do dia para vazões fixas diferentes. Volta-se ao local de ensaio em dias diferentes, repetindo-se tudo desde o momento de posicionamento do solarímetro, a fim de obter o maior número de dados possíveis. Os experimentos foram conduzidos nos dias 14, 15 e 16/11/2018 no município de Paraibuna-SP (LAT: -23,366906, LONG: -45,667779).

Para a análise dos dados sincronizaram-se os horários obtidos pelo relógio do Datalogger do solarímetro aos horários do relógio da plataforma de prototipagem eletrônica Arduíno através do horário anotado de início de aquisição de dados. Esse passo é importante, pois, esses aquisidores de dados possuem relógios em tempos diferentes, sendo necessário garantir a simultaneidade das medidas.

Em sequência, descartam-se todas medidas que não se encontram em regime permanente. O critério utilizado nesse estudo foi o de aceitar como regime permanente todos os dados em que durante um período de 5 minutos a irradiação variou menos do que 50W/m^2 e a temperatura de saída da água variou menos do que $0,5^\circ\text{C}$.

A partir da filtragem dos dados escolhidos, calculou-se a energia útil do coletor através da Equação 8 e a energia total incidente no coletor pela Equação 1. Com essas energias, calcula-se o rendimento pela Equação 9.

Traçaram-se, portanto, gráficos de rendimento térmico por vazão para diversos valores de irradiância com o intuito de encontrar um ponto de máximo, o que indicaria a vazão ótima para aquela condição de irradiância.

Em seguida, obteve-se a média aritmética das temperaturas medidas pelos sensores instalados no painel do coletor solar e gerou-se um gráfico da eficiência térmica obtida frente a diferença de temperatura do coletor e do ambiente para diferentes faixas de irradiância. Esse gráfico tem como intuito ser de comparação à Figura 14, de modo a perceber se as medidas obtidas estão de acordo com o que é esperado, além de ratificar a temperatura média do painel como parâmetro de controle da vazão ótima.

Para o cálculo do ganho de eficiência elétrica que o coletor solar híbrido teve devido o resfriamento da temperatura do coletor, calculou-se a diferença de temperatura entre o coletor e a temperatura da condição padrão de teste, a temperatura teórica que o painel deveria estar

caso não houvesse resfriamento a partir da Equação 21 e a diferença da temperatura ambiente para a temperatura da condição de teste.

A partir da Equação 22, podem-se utilizar essas temperaturas e o coeficiente de temperatura da potência máxima fornecida nas características do coletor para calcular qual é a eficiência do coletor solar híbrido, qual seria sua eficiência caso não houvesse o resfriamento e qual seria sua eficiência no caso de vazão ótima, podendo-se comparar, assim, os dados obtidos.

É importante ressaltar que não é necessário obter a vazão ótima para o cálculo dessa eficiência, afinal, vê-se pela Figura 14 que o caso de eficiência máxima ocorre quando a temperatura do painel é igual a temperatura ambiente.

4 Resultados e discussões

Ao longo das medições foram encontrados dados de irradiância e de temperatura ambiente ao longo do tempo apresentados na Figura 30, os quais representam as condições climáticas encontradas nos horários dos ensaios.

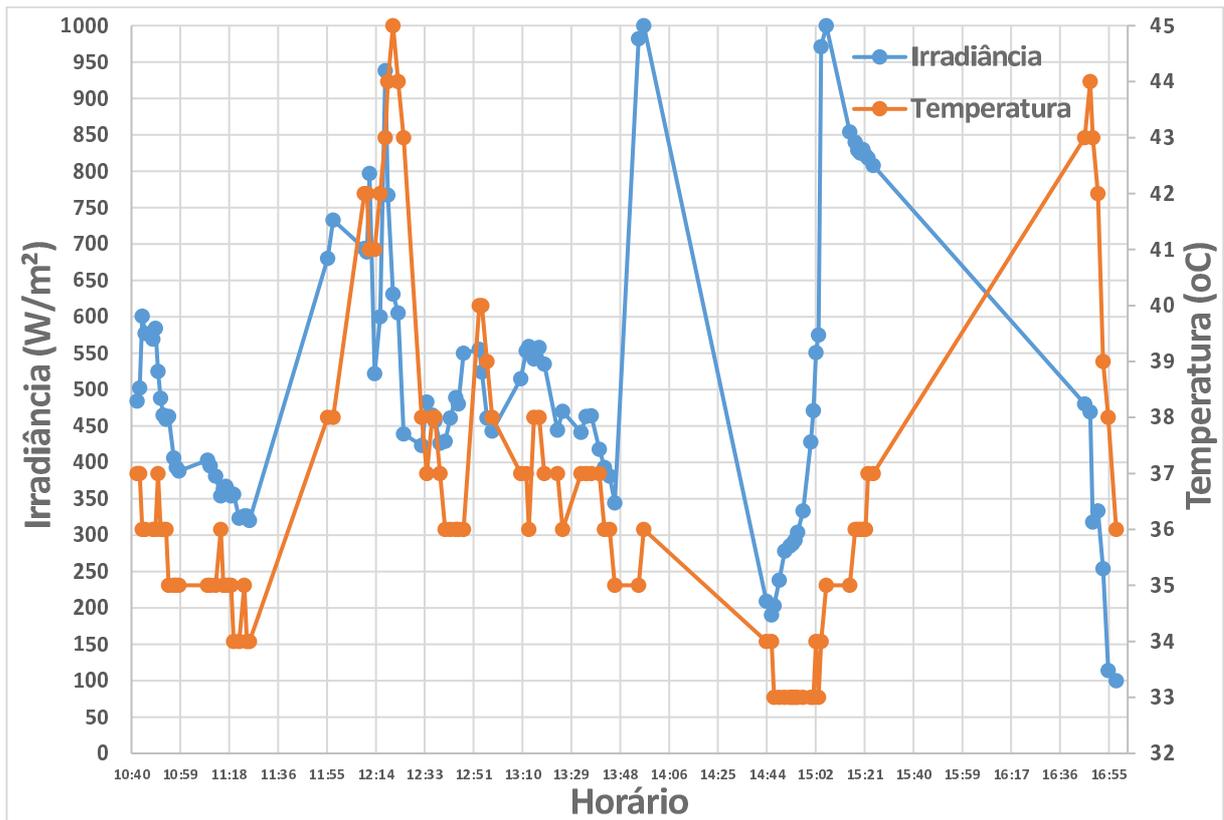


Figura 30. Irradiância e temperatura ambiente durante o horário dos ensaios

Seguindo a metodologia proposta, obtiveram-se os seguintes resultados:

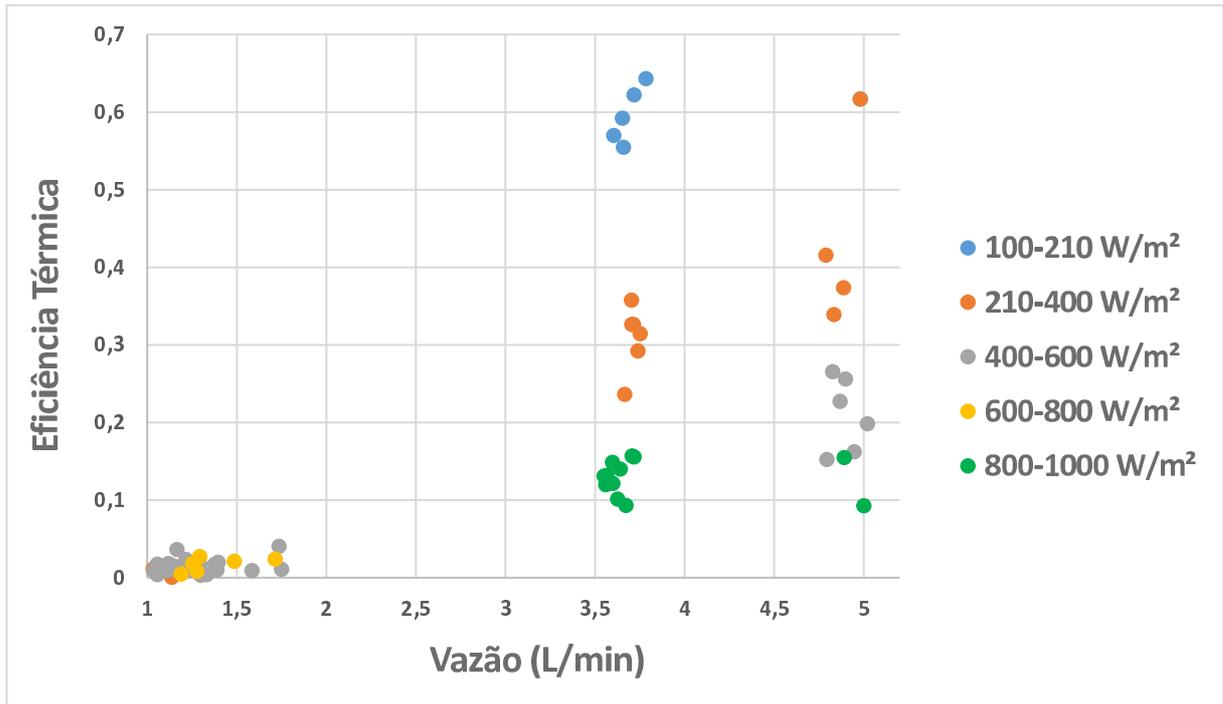


Figura 31. Gráfico obtido de eficiência x vazão para diversos valores de irradiação

Analisando a Figura 31, percebe-se que as vazões mais altas concentram-se em vazões próximas a 3,7 L/min e a 4,8 L/min. Fixando essas vazões, observa-se claramente que o aumento da irradiação conduziu a perda de eficiência térmica. Analogamente, analisando-se as irradiações por bloco, observou-se que as eficiências térmicas reduziram com o aumento das faixas de irradiação. Esses dados parecem indicar que as eficiências poderiam ser maiores caso fosse possível aumentar a vazão pelo incremento da vazão da bomba. Aparentemente, especialmente nas maiores irradiações, os dados parecem indicar que a vazão da bomba foi insuficiente para resfriar a temperatura dos coletores mantendo elevada diferença de temperatura em relação à temperatura ambiente, promovendo elevadas perdas térmicas e consequentemente, baixas eficiências.

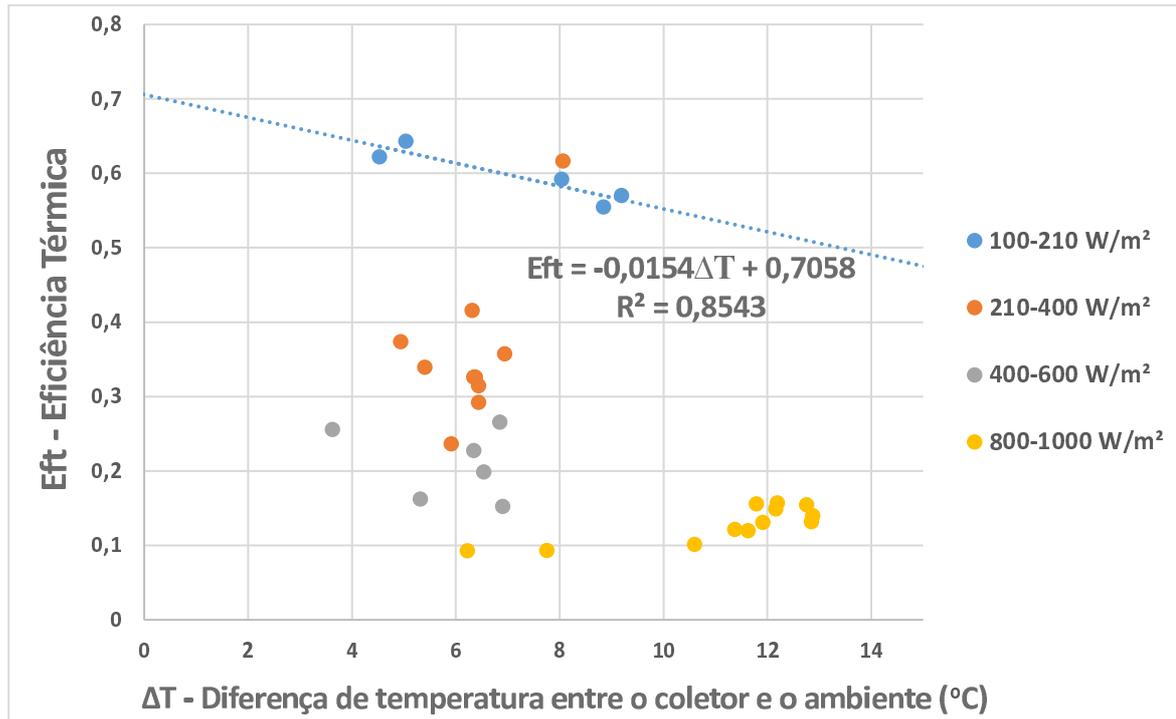


Figura 32. Gráfico obtido de eficiência x diferença de temperatura entre o coletor e o ambiente

Ao comparar a Figura 32 com a Figura 14, percebe-se que apenas os dados na faixa mais baixa de irradiância (100 a 210 W/m²) comportam-se como o esperado, pois, os dados das outras faixas não mostram um decaimento da eficiência térmica com o aumento da diferença de temperatura entre o coletor e o ambiente. Essa falta de similaridade com o resultado esperado é causada pelo fato das vazões de operação obtidas nas maiores irradiâncias estarem muito abaixo da vazão necessária. De fato, na vazão máxima trabalhada obteve-se um fluxo de água igual a 13,25 L/(h.m²) muito abaixo da faixa recomendada de operação em painéis híbridos (21,5 a 269,2 L/(h.m²)) (2POWER, 2015; SOLUZ, 2018).

Por outro lado, a faixa de irradiância de 100 a 210 W/m² apresenta um fator de perda de 0,0154 °C⁻¹ e um fator de ganho de 0,7, ao passo que os coletores térmicos possuem um fator de ganho que varia de 0,398 a 0,857 (INMETRO, 2018). Cabe ressaltar que os fatores de ganho obtidos pelo INMETRO consideram como referência a irradiância que chega ao absorvedor (rendimento instantâneo, conforme a Equação 10), ao passo que no presente trabalho a referência de cálculo foi a irradiância que chega à superfície do painel (eficiência térmica, conforme Equação 9). Portanto, nessa faixa de irradiância, aparentemente, obtiveram-se vazões mais próximas à necessária, sendo possível estimar o fator de ganho e extrapolar esse fator para as demais irradiâncias.

Percebe-se, portanto, que o melhor comportamento é mostrado para a faixa de irradiância de 100 a 210 W/m², tornando-se interessante um estudo do seu comportamento apenas para essa faixa e gerando, portanto a Figura 33.

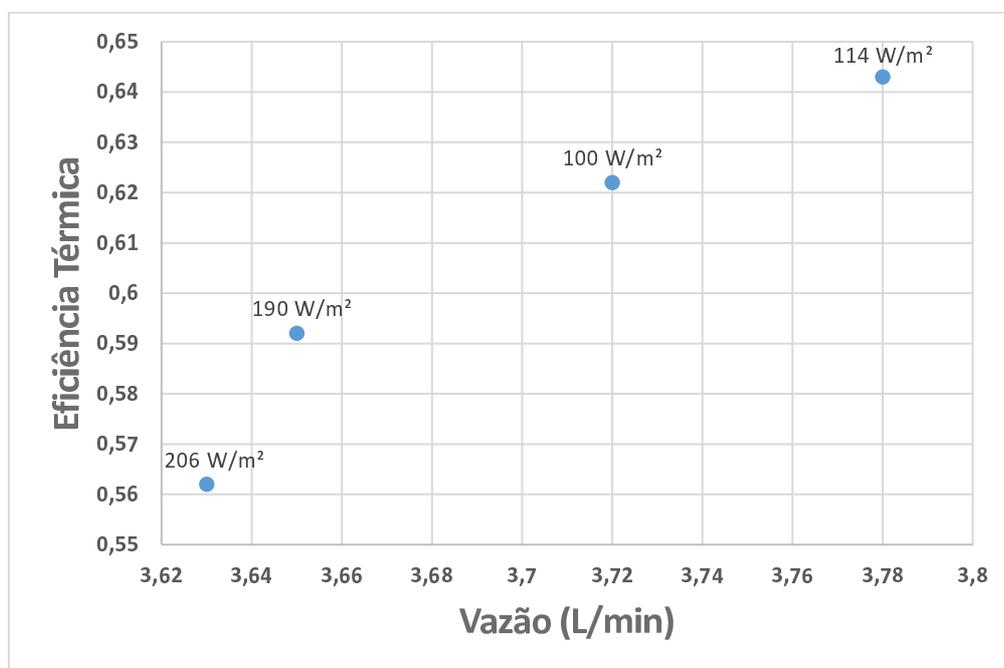


Figura 33. Gráfico obtido de eficiência x vazão para faixa de irradiância de 100 a 210 W/m²

Para obtenção da Figura 33 foi feita a média da vazão e da eficiência de dois pontos que apresentavam irradiância muito parecidas, a fim de possibilitar uma melhor análise. Percebe-se, então, que há um aumento da eficiência térmica com o aumento da vazão. Todavia, resta concluir se esse aumento da eficiência foi realmente ocasionado pelo aumento da vazão ou simplesmente pela diminuição da irradiância. Ao analisar, os pontos com irradiâncias mais próximas (190 W/m² com 206 W/m² e 100 W/m² com 114 W/m²) reduz-se a influência da irradiância e possibilita concluir que realmente há um aumento de eficiência com o aumento da vazão. Dessa forma, o resultado obtido indica que, até para faixa de irradiância mais baixa, as eficiências poderiam ser maiores caso fosse possível aumentar a vazão pelo incremento da vazão da bomba.

Em seguida, analisou-se a eficiência elétrica obtida. Como a eficiência elétrica dos painéis fotovoltaicos são baixas, a influência da vazão só foi analisada para a maior faixa de irradiação (800 a 1000 W/m²). Obtendo-se, portanto, os seguintes resultados:

Q (L/min)	G (W/mw ²)	Eficiência do PVT com vazão de campo (Q)	Eficiência do PVT com vazão nula	Eficiência do PVT com vazão ótima
3,708	982	13,1%	12,6%	13,8%
3,718	1000	13,0%	12,6%	13,8%
5,001	971	13,5%	12,6%	13,9%
4,891	1000	13,3%	12,6%	13,8%
3,674	854	13,2%	12,9%	13,8%
3,626	840	13,0%	12,9%	13,8%
3,56	829	13,1%	12,9%	13,8%
3,6	825	13,0%	13,0%	13,8%
3,551	830	13,0%	12,9%	13,8%
3,565	822	13,0%	13,0%	13,8%

Tabela 1. Eficiência elétrica do painel híbrido (PVT) para a vazão estudada, para vazão nula (simulação de um painel fotovoltaico) e para vazão ótima

Q (L/min)	G (W/mw ²)	Ganho relativo do PVT com vazão de campo (Q) sobre o PVT com vazão nula	Ganho relativo do PVT com vazão ótima sobre o PVT com vazão nula	Ganho Relativo do PVT com vazão ótima sobre o PVT com vazão de campo (Q)
3,708	982	3,5%	8,7%	5,8%
3,718	1000	3,8%	8,7%	5,6%
5,001	971	6,8%	9,0%	2,9%
4,891	1000	6,1%	9,0%	3,6%
3,674	854	2,1%	6,8%	5,0%
3,626	840	0,9%	6,1%	5,5%
3,56	829	0,9%	6,0%	5,4%
3,6	825	0,5%	5,9%	5,7%
3,551	830	0,2%	6,0%	6,2%
3,565	822	0,0%	5,8%	6,2%

Tabela 2. Ganho relativo de eficiência elétrica entre o painel híbrido (PVT) com vazão de campo (Q) e com vazão nula (simulação de um painel fotovoltaico) entre o PVT com vazão ótima e com vazão nula e entre o PVT com vazão ótima e o com vazão de campo (Q)

Percebe-se, portanto, que houve um ganho relativo médio de 2,48% de eficiência elétrica entre o PVT com vazão de campo (Q) sobre a simulação do painel fotovoltaico. Esse ganho estima, nas condições do experimento, a vantagem obtida na substituição do painel fotovoltaico pelo painel híbrido mesmo sem um sistema de controle de vazão eficiente. Caso o sistema estudado estivesse trabalhando em vazão ótima esse ganho de eficiência sobre o painel fotovoltaico corresponderia em média a 7,19%.

Apesar do baixo ganho de eficiência elétrica obtido pela utilização de um PVT, vale ressaltar que o PVT apresentou potencial de ganho de eficiência térmica na faixa de 70%, podendo, portanto, reduzir a demanda de energia elétrica do usuário. Cabe ressaltar ainda que os painéis híbridos utilizados foram na verdade painéis fotovoltaicos adaptados com custo mais baixo. Em face ao exposto, ratifica-se o potencial desse uso, especialmente com um sistema de controle de vazão.

5 Conclusões

Ao longo do presente trabalho, verificou-se ganho de eficiência do circuito com o aumento da vazão para todos os valores de irradiância plotados. Ou seja, a maior vazão do circuito não foi suficiente para aproveitar toda energia recebida. Adicionalmente, percebeu-se que para valores próximos de vazão a eficiência abaixa com o aumento da irradiância, significando que o aumento de energia incidente é desperdiçado pelo fato da vazão estar abaixo do esperado para o sistema. Esse aumento da energia incidente nos coletores sem um respectivo aumento de energia térmica útil também evidencia que a vazão máxima do sistema não foi suficiente para aproveitar toda a energia recebida.

Consequentemente, percebeu-se que os dados obtidos foram diferentes do esperado, com exceção dos valores medidos para a faixa mais baixa de irradiância, evidenciando a importância da análise da menor faixa de irradiância para esse estudo.

Com esse estudo, foi possível concluir que a maneira mais prática de se encontrar a vazão ótima do sistema tomando a temperatura como parâmetro de controle é igualar a temperatura do painel à temperatura ambiente. Dessa forma, o ideal seria um sistema de controle que alterasse a vazão do sistema de forma que se mantenha uma igualdade entre a temperatura ambiente e a temperatura do painel, obtendo-se dessa forma a vazão ótima para qualquer faixa de irradiância.

Apesar do ganho de eficiência elétrica obtido pelo PVT ser, na média, de 7,19% para os casos ótimos, o que é considerado um ganho baixo, vale ressaltar que o PVT apresentou potencial de ganho de eficiência térmica na faixa de 70%, podendo, portanto, reduzir a demanda de energia elétrica do usuário. Cabe ressaltar ainda que os painéis híbridos utilizados foram na verdade painéis fotovoltaicos adaptados com custo mais baixo. Em face ao exposto, ratifica-se o potencial desse uso, especialmente com um sistema de controle de vazão.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15569: Sistema de aquecimento solar em água em circuito direto – Projeto e instalação**, 2008
- AMINE, M; MEZNI, T; ALI, M; GUIZANI, A, **Energetic performance and economic analysis of a solar water heating system for different flow rates values: A case study**, 2017
- BLUESOL; **Os sistemas de energia solar fotovoltaica**. Livro digital de introdução aos sistemas solares, 2014
- CARDOSO, N, **Análise de sistema híbrido solar: fotovoltaico e térmico**, 2016
- CASTRO, R, **Energias renováveis e produção descentralizadas**. Introdução a energia fotovoltaica, 2002
- COMGÁS NATURAL; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PELA CONFORMIDADE E EFICIÊNCIA DE INSTALAÇÕES (ABRINSTAL), **Sistemas de aquecimento de água para edifícios através da associação energia solar e gás natural**. Manual técnico para projeto e construção de sistemas de aquecimento solar e gás natural, 2011
- DEMONTI, R, **Sistema de co-geração de energia a partir de painéis fotovoltaicos**, 1998
- FARAHAT, S; SARHADDI, F; AJAM, H, **Exergetic optimization of flat plate solar collectors**, 2009
- FARINA, H, **Alternativa para sistemas prediais de aquecimento de água: enfoque na conservação de insumos**, 2009
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, **PBE – Coletor solar aplicação banho e piscina**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/Coletor-Solar-Banho-PBE-2018.pdf>>. Acesso em 29 nov. 2018, 13:51
- LÓPEZ, J. I., **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**, 2009

MOUSA, W; TALIBE, A; ALI, H; SUMER, T; AMIR, A; AL-AMIERY, A, **Case study on solar water heating for flat plate collector**, 2018

SLEMAN, A, **Análise da viabilidade econômica da utilização de aquecedores solares de água em resorts no nordeste do Brasil**, 2006

SOLUZ, **Conheça nosso produto**. Disponível em: <<https://www.soluzenergia.com/produto>>.

Acesso em: 29 nov. 2018, 13:59

TADEU, R; BERNARDES, L; MENEZES, A; MONTORO, V; YUKARI, C; OLIVEIRA, L, **Levantamento do estado da arte: energia solar**, 2007

2POWER, **Ensaio de módulo fotovoltaico**, 2015

Apêndice A – Programa implementado na plataforma de prototipagem eletrônica Arduíno

```

#include <OneWire.h>

#include <SPI.h>
#include <SD.h>

const int chipSelect = 4;

// These constants won't change. They're used to give names
// to the pins used:
const int VoltPvPin1 = A0; // Analog input pin that measure Photovoltaic Panel #1 Voltage

const int CurrentPvPin1 = A3; // Analog input pin that measure PV Panel #1 Current (Shunt
Voltage)

const int VoltPvPin2 = A1; // Analog input pin that measure Photovoltaic Panel #2 Voltage

const int CurrentPvPin2 = A2; // Analog input pin that measure PV Panel #2 Current (Shunt
Voltage)

volatile int flow_frequency; // Measures flow meter pulses
//float l_min; // Calculated litres/min
// unsigned int l_hour; // Calculated litres/hour
//float l_hour; // Calculated litres/hour
unsigned char flowmeter = 2; // Flow Meter Pin number

// Date and time functions using a DS3231 RTC connected via I2C and Wire lib
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"

RTC_DS3231 rtc;

const int NS = 4; // Numero de sensores disponiveis
const int
  SensorPin1 = 4, // Pino do sensor de temperatura 1
  SensorPin2 = 5, // Pino do sensor de temperatura 2
  SensorPin3 = 7, // Pino do sensor de temperatura 3
  SensorPin4 = 8; // Pino do sensor de temperatura 4
const int
  SensorPin5 = 9, // Pino do sensor de temperatura 5
  SensorPin6 = 6; // Pino do sensor de temperatura 6

const int
  switchONPin = 3; // Pino que liga acessorios eletricos

```

```

unsigned int iTime = 0;

void flow ()          // Interruot function
{
    flow_frequency++;
}

void setup(void) {
String fileHeader = "";
String filelog;

#ifdef ESP8266
    while (!Serial); // for Leonardo/Micro/Zero
#endif

    // Open serial communications and wait for port to open:
    Serial.begin(9600);
    while (!Serial) {
        ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
    }

    Serial.print("Iniciando Memoria...");

    // make sure that the default chip select pin is set to
    // output, even if you don't use it:
    pinMode(SS, OUTPUT);

    // see if the card is present and can be initialized:
    if (!SD.begin(chipSelect)) {
        Serial.println("Sem Cartão, ou não presente");
        // don't do anything more:
        while (1);
    }
    Serial.println("Iniciando Sistema.");

    if (!rtc.begin()) {
        Serial.println("Couldn't find RTC");
        while (1);
    }

    if (rtc.lostPower()) {
        Serial.println("RTC lost power, lets set the time!");
        // following line sets the RTC to the date & time this sketch was compiled
        rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
        // This line sets the RTC with an explicit date & time, for example to set
        // January 21, 2014 at 3am you would call:
        // rtc.adjust(DateTime(2014, 1, 21, 3, 0, 0));
    }

    DateTime now = rtc.now();

```

```

fileHeader = "iTime";
fileHeader += ", \tYYYY/MM/DD";
fileHeader += ", HH:MM:SS,\t";
fileHeader += "T1 [oC], T2 [oC], T3 [oC], T4 [oC]";
fileHeader += ", T5 [oC], T6 [oC]";
fileHeader += ", \tTensao#1 [V], I#1 [A]";
fileHeader += ", \tTensao#2 [V], I#2 [A]";
fileHeader += ", \tQ [l/min]";
// fileHeader += ", \tQ [l/h]";

// filelog = "datalog";
// filelog += "-";
filelog = String(now.year());
filelog += String(now.month());
filelog += String(now.day());
filelog += ".txt";

File dataFile = SD.open( filelog, FILE_WRITE);
if(!dataFile) {
  Serial.print("!!! Error opening >>>>> ");
  Serial.print(filelog);
  Serial.println(" <<<<< !!!");
}

// if the file is available, write to it:
if (dataFile) {
  dataFile.println(fileHeader);
  Serial.println(fileHeader);
  dataFile.close();
}
// if the file isn't open, pop up an error:
else {
  Serial.println("error opening datalog.txt");
}

// SETUP do Flow Meter
pinMode(flowmeter, INPUT);
attachInterrupt(0, flow, RISING);

// initialize the switchON pin as an output:
pinMode(switchONPin, OUTPUT);
digitalWrite(switchONPin, LOW);

sei(); // Enable interrupts
}

void loop(void) {

boolean runOK = false; // Variavel para habilitar aquisicao

```

```

const int startHour = 0,
      stopHour = 24;

int powerState = LOW;      // powerState used to set the Accessories Power

float l_min;      // Calculated litres/min
// unsigned int l_hour;      // Calculated litres/hour
//float l_hour;      // Calculated litres/hour

OneWire ds1(SensorPin1),
      ds2(SensorPin2),
      ds3(SensorPin3),
      ds4(SensorPin4),
      ds5(SensorPin5),
      ds6(SensorPin6);

DateTime now = rtc.now();

float pvVoltValue1 = 0;    // PV Voltage panel #1
float pvCurrentValue1 = 0; // PV Shunt panel #1

float pvVoltValue2 = 0;    // PV Voltage panel #2
float pvCurrentValue2 = 0; // PV Shunt panel #2

int delayMeas = 1; // delay between measures [s]

float temp[NS];

// make a string for assembling the data to log:
String dataString = "";
String filelog;

File dataFile;

runOK = (( now.hour() >= startHour)&&(now.hour() <= stopHour)) ? true : false);
// Switch power On or Off
powerState = ((runOK) ? HIGH : LOW);
// set the switchONPin with the powerState of the variable:
digitalWrite(switchONPin, powerState);

if(runOK) {

  filelog = String(now.year());
  filelog += String(now.month());
  filelog += String(now.day());
  filelog += ".txt";

  dataFile = SD.open( filelog, FILE_WRITE);
  // open the file. note that only one file can be open at a time,

```

```

// so you have to close this one before opening another.
if(!dataFile) {
  Serial.print("!!! Error opening >>>>> ");
  Serial.print("datalog1.txt");
  Serial.println(" <<<<< !!!");
}

dataString = String(iTime++);
dataString += ", \t";

dataString += String(now.year());
dataString += '/';
dataString += String(now.month());
dataString += '/';
dataString += String(now.day());
dataString += ", ";
dataString += String(now.hour());
dataString += ':';
dataString += String(now.minute());
dataString += ':';
dataString += String(now.second());
dataString += ", ";

if (dataFile) {
  dataFile.print(dataString);
  // print to the serial port too:
  Serial.print(dataString);
}
// if the file isn't open, pop up an error:
else {
  Serial.print("!!! Error opening >>>>> ");
  Serial.print(filelog);
  Serial.println(" <<<<< !!!");
}

// read three sensors and append to the string:

// #####
// LENDO TEMPERATURAS DO 1o PAINEL
// #####

temp[0] = getTemp( ds1);
temp[1] = getTemp( ds2);
temp[2] = getTemp( ds3);
temp[3] = getTemp( ds4);

dataString = " ";
for (int i = 0; i < NS; i++) {
  dataString += " ";
  dataString += String(temp[i], 2);
}

```

```

    if (i < (NS-1)) {
        dataString += ", ";
    }
}

// #####
// LENDO TEMPERATURAS DO 2o PAINEL
// #####

temp[0] = getTemp( ds5);
temp[1] = getTemp( ds6);

dataString += ", ";
for (int i = 0; i < 2; i++) {
    dataString += " ";
    dataString += String(temp[i], 2);
    if (i < (2-1)) {
        dataString += ", ";
    }
}

// #####
// LENDO TENSAO E CORRENTE DO 1o PAINEL
// #####

// read the value from the PV-Voltage sensor:
pvVoltValue1 = ((float)analogRead(VoltPvPin1)/(float)1023)*5.0*7.8997;
// read the value from the PV-Shunt sensor:
pvCurrentValue1 = ((float)analogRead(CurrentPvPin1)/(float)1023)*5.0*6.0;

dataString += ", \t ";
dataString += String(pvVoltValue1, 2);

dataString += ", \t";
dataString += String(pvCurrentValue1, 2);

// #####
// LENDO TENSAO E CORRENTE DO 2o PAINEL
// #####

// read the value from the PV-Voltage sensor:
pvVoltValue2 = ((float)analogRead(VoltPvPin2)/(float)1023)*5.0*7.8997;
// read the value from the PV-Shunt sensor:
pvCurrentValue2 = ((float)analogRead(CurrentPvPin2)/(float)1023)*5.0*6.0;

dataString += ", \t\t";
dataString += String(pvVoltValue2, 2);

dataString += ", \t";

```

```

dataString += String(pvCurrentValue2, 2);

// #####
// LENDO VAZAO DO 1o PAINEL
// #####

    l_min = ((float)flow_frequency / (float)32);    // Pulse frequency (Hz) = 7.5Q, Q is flow
rate in L/min. (Results in +/- 3% range)
//    l_hour = ((float)(flow_frequency * 60) / (float)7.5); // (Pulse frequency x 60 min) / 7.5Q
= flow rate in L/hour
    flow_frequency = 0;        // Reset Counter

    dataString += ",\t ";
    dataString += String(l_min, 2);
//    dataString += String(l_hour, 2);

// #####
// ESCREVENDO NO CONSOLE E NO ARQUIVO filelog
// #####

// if the file is available, write to it:
if (dataFile) {
    // print to the file
    dataFile.println(dataString);
    // print to the serial port too:
    Serial.println(dataString);
//    dataFile.close();
}
// if the file isn't open, pop up an error:
else {
    Serial.print("!!!! Error opening >>>>> ");
    Serial.print(filelog);
    Serial.println(" <<<<< !!!!");
}

delay((unsigned)delayMeas*1000);

now = rtc.now();
runOK = (( now.hour() >= startHour)&&(now.hour() <= stopHour)) ? true : false);
    // Switch power On or Off
powerState = ((runOK) ? HIGH : LOW);

    // set the switchONPin with the powerState of the variable:
digitalWrite( switchONPin, powerState);

if(dataFile) {
    dataFile.close();
}

```

```

    }

} // END IF()

}

float getTemp( OneWire& ds){

byte data[12];
byte addr[8];

if ( !ds.search(addr)) {
//no more sensors on chain, reset search
ds.reset_search();
return -1000;
}

if ( OneWire::crc8( addr, 7) != addr[7]) {
Serial.println("CRC is not valid!");
return -1000;
}

if ( addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) {
Serial.print("Device is not recognized");
return -1000;
}

ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0x44,1);

byte present = ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0xBE);

for (int i = 0; i < 9; i++) {
data[i] = ds.read();
}

ds.reset_search();

byte MSB = data[1];
byte LSB = data[0];

float TRead = ((MSB << 8) | LSB);
float Temperature = TRead / 16;

return Temperature;}

```

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 22 de novembro de 2018	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-112/2018	4. N° DE PÁGINAS 70
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Estudo da influência da vazão sobre a eficiência energética de painéis solares híbridos.			
6. AUTOR(ES): Eros Gimenes de Queiroz			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Coletor solar híbrido; Otimização; Vazão.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Coletores solares; Painéis, Conversão de energia; Mecanismos; Temperatura; Engenharia mecânica.			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Prof. Dr. Ten. Cel. Marcio Antonio da Silva Pimentel. Publicado em 2018.			
11. RESUMO: Esse trabalho consiste em um estudo dos fatores de influência na eficiência dos coletores solares híbridos. Tem-se como hipótese que para cada valor de irradiância solar, há uma vazão que geraria o maior ganho térmico e elétrico para o coletor. Dessa hipótese, tem-se a consequência de que em regime permanente seria possível descobrir se o sistema se encontra na vazão ótima apenas analisando a temperatura de entrada, de saída e do painel. Dessa forma, foi realizado um estudo da influência da vazão sobre a eficiência dos coletores solares híbridos tendo a temperatura como parâmetro de controle. Por meio desse, foram obtidas as eficiências do painel híbrido para o caso de vazão ótima, o que resultou em uma eficiência térmica de 70% e em um ganho de eficiência elétrica de 7,19% em relação ao painel fotovoltaico. Por fim, descobriu-se que o melhor parâmetro de controle é a temperatura da superfície do painel híbrido.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			