
RASTREADOR SOLAR PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM REAPROVEITAMENTO TÉRMICO

Sérgio Luis Rabelo de Almeida

José Vitor Silvestre dos Santos

Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

Resumo

Este artigo discute o desenvolvimento de um sistema de rastreamento solar de construção simples e baixo consumo energético capaz de reaproveitar a carga térmica residual incidente sobre o módulo fotovoltaico e, assim, aumentar significativamente a eficiência do sistema e consequentemente a potência gerada. O protótipo mostrou um aumento de potência elétrica de 12,5% e gerou 6,5 vezes mais energia quando considerado também a energia térmica reaproveitada. O projeto se apresentou como uma alternativa sustentável para a geração de energia elétrica no país devido ao melhor uso dos recursos naturais disponíveis.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica. Rastreador solar. Reaproveitamento térmico.

1 INTRODUÇÃO

O presente artigo trata do desenvolvimento de um sistema de rastreamento solar de baixo consumo elétrico, capaz de aproveitar a energia térmica que incide sobre o módulo fotovoltaico, que servirá como base para a concepção de um produto final. Para o rastreamento, serão utilizados dois resistores dependentes de luz dispostos e igualmente espaçados na face superior do painel, com o objetivo de mensurar a luminosidade sobre o painel. Quando a diferença dos valores coletados através dos sensores for significativa, o painel iniciará o movimento de rastreamento do Sol visando mantê-lo sempre direcionado à maior incidência solar direta.

O aproveitamento térmico ocorrerá por uma placa de material isolante acoplada no rastreador e ficará em contato com a parte traseira do módulo. Essa placa possui uma cavidade por onde a água escoará a fim de remover a carga térmica residual do painel e sua propriedade isolante garantirá que essa energia térmica seja transferida somente para o fluido e não dispersa para o ambiente por convecção. A Figura 1 ilustra um esquema do protótipo idealizado com as partes principais.

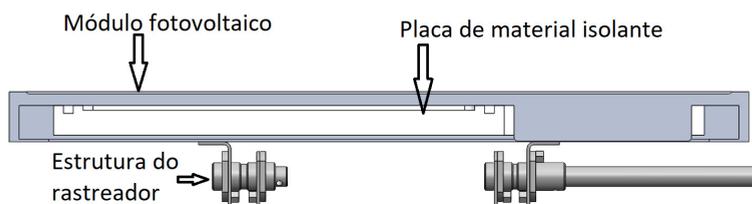


Figura 1 Esquema do sistema de reaproveitamento térmico com rastreamento.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Ao remover a carga térmica do painel através da água que fluirá na placa, ocorre um aumento de eficiência deste em razão das propriedades do material do módulo que funciona melhor em ambientes frios e com alta radiação. Realizar essa remoção de calor residual traz vários benefícios para o correto funcionamento dos painéis fotovoltaicos, pois com o aumento da temperatura do módulo há uma redução significativa em sua tensão e um aumento mínimo na corrente, fazendo com que haja uma grande queda na potência de saída e uma aceleração na degradação das células fotovoltaicas (SIECKER *et al.*, 2017).

Aliado ao rastreamento, esse sistema será capaz de reduzir significativamente o investimento inicial necessário para instalar um sistema fotovoltaico, uma vez que concilia o aumento de potência gerada com a redução de energia elétrica necessária em

uma residência. Isso se dá por dois fatores: o correto alinhamento com o Sol, que permite maior recepção de radiação solar direta, melhorando o aproveitamento da energia incidente, e a diminuição da diferença de temperatura de conforto térmico *versus* a de fornecimento da rede nos pontos de utilização de água quente, pois, quanto menor esse valor, menos energia será gasta para se alcançar o conforto térmico nas atividades desenvolvidas pelos residentes no dia a dia (THORAT *et al.*, 2017; AL-ROUSAN; MATISA; MATDESA, 2018).

Esse sistema também oferece vantagem para as distribuidoras de energia por reduzir a potência de pico necessária nos horários de ponta, período do dia de maior utilização da rede, pela remoção do uso do chuveiro elétrico, que, segundo Gardenal (2014), respondem por até 40% do consumo de energia elétrica residencial no horário de pico nas regiões Sul e Sudeste. Se esse consumo continuar a subir, será necessário construir novas usinas e linhas de transmissão somente para atender a esse período, gerando grandes impactos ambientais e custos sociais elevados, por isso muitas distribuidoras estão criando programas de conscientização e eficiência energética a fim de mover o máximo possível o consumo para horários fora do intervalo de ponta.

Os objetivos deste artigo são o desenvolvimento de um sistema de rastreamento, incluindo tanto a parte mecânica quanto a eletrônica, responsável por alinhar o módulo fotovoltaico com o Sol, bem como um sistema de troca de calor para o painel fotovoltaico; e um estudo comparativo entre sistemas convencionais fotovoltaicos e o proposto neste artigo, realizado com base em testes utilizando dois painéis de especificações semelhantes, a fim de se obter valores que demonstrem o aumento ou não da potência total gerada, que servirá como base para a concepção de um produto final.

2 METODOLOGIA

Um estudo foi realizado para verificar a real eficácia de um sistema híbrido fotovoltaico-térmico. Os objetivos deste estudo consistem em determinar a capacidade do sistema e obter um valor de temperatura que representasse a maior economia financeira possível, ao reduzir os gastos necessários para se obter água quente nos pontos de utilização. Posteriormente, foi desenvolvido o projeto básico do protótipo e finalmente alguns ensaios de aferição dos requisitos estabelecidos.

2.1 Definição dos requisitos do sistema

Para este estudo ser realizado, alguns dados foram estabelecidos previamente, a fim de padronizar os cálculos presentes nesta e em futuras análises desenvolvidas durante este artigo. Os dados podem ser conferidos na Tabela 1.

TABELA 1

Dados iniciais para os estudos do sistema híbrido.

Temperatura ideal painel	25 °C
Temperatura máxima painel	72 °C
Coefficiente de P_{max}	-0,45%/ °C
Perda de Eficiência Máxima	-21,15%
Potência Sistema FV	1,59 kW
Temperatura ideal banho	38 °C
Vazão ideal chuveiro	0,15 L/s
Vazão mínima chuveiro	0,1 L/s
Vazão média experimental	0,055 L/s
Temperatura água fria média	18 °C
Tempo médio banho	10 min
Preço por kWh	0,64 RS
Potência média chuveiro	5500 W
Potência mínima chuveiro	2000 W
n° de pessoas	4 /casa
cH2O	4,18 kJ/kg °C

Fonte: Elaborada pelos autores.

Como pode ser visto, diversos dados foram considerados a fim de padronizar os cálculos: a Temperatura ideal do painel foi baseada no padrão STC (NICLAS, 2011); a Temperatura máxima do painel foi adotada a fim de limitar os valores do estudo; o coeficiente de P_{max} foi retirado do *datasheet* do módulo FV utilizado (YINGLI, 2013); a Perda de eficiência máxima foi calculada utilizando o coeficiente de P_{max} e as temperaturas anteriormente mencionadas; a Potência Sistema FV foi adotada com base em um sistema solar composto por 6 painéis de 265 W cada, capaz de gerar energia para suprir as necessidades de uma casa com quatro pessoas; a Temperatura ideal banho foi adotada por ser um pouco acima da temperatura corporal, conforme Forder (2005); a Vazão ideal chuveiro e a Vazão mínima chuveiro foi adotada de acordo com Belinazo (2004); a Vazão média experimental e a Temperatura de água fria média foram obtidas através de medidas experimentais realizadas ao longo de dois meses; o Tempo médio banho foi adotado para padronizar os cálculos; o Preço por kWh foi obtido de uma conta de energia elétrica da AES Eletropaulo do mês de junho de 2016; a Potência média chuveiro e a Potência mínima chuveiro foram obtidas por meio de pesquisas de chuveiros elétricos disponíveis no mercado nacional; o número de pessoas foi adotado para o estudo com base em uma família de dois adultos e duas crianças; e o calor específico a pressão constante da água foi adotado para uma temperatura de 25 °C (SMITH; VAN NESS; ABOTT, 2000).

Com esses dados foram iniciados os estudos, a fim de determinar a temperatura que representava a maior economia monetária possível em um sistema híbrido, esse valor mostraria a melhor temperatura para manter a água utilizada para resfriar os módulos fotovoltaicos e consequentemente para ser utilizada durante o banho e demais pontos de utilização de água quente da residência. Além disso, indicaria a redução da perda de eficiência em razão do aumento de temperatura dos painéis que com esse sistema trabalharia em valores menores do que o usual, quando resfriado somente por convecção natural. A primeira parte do estudo pode ser analisada na Tabela 2.

TABELA 2

Estudo para determinar a temperatura da água de resfriamento do sistema.

Taf (°C)	Taq (°C)	ΔT (°C)	P (kW)	Consumo (kwh/min)	Custo (R\$/min)	Custo (R\$/dia)
10	38	28	11,7	0,195	0,125	4,994
11	38	27	11,3	0,188	0,120	4,815
12	38	26	10,9	0,181	0,116	4,637
13	38	25	10,5	0,174	0,111	4,459
14	38	24	10,0	0,167	0,107	4,280
15	38	23	9,6	0,160	0,103	4,102
16	38	22	9,2	0,153	0,098	3,924
17	38	21	8,8	0,146	0,094	3,745
18	38	20	SA	0,39	0,089	3,567
19	38	19	7,9	0,132	0,085	3,389
20	38	18	7,5	0,125	0,080	3,210
21	38	17	7,1	0,118	0,076	3,032
22	38	16	6,7	0,111	0,071	2,854
23	38	15	6,3	0,105	0,067	2,675
24	38	14	5,9	0,098	0,062	2,497
25	38	13	5,4	0,091	0,058	2,319
26	38	12	5,0	0,084	0,054	2,140
27	38	11	4,6	0,077	0,049	1,962
28	38	10	4,2	0,070	0,045	1,783
29	38	9	3,3	0,063	0,040	1,605
30	38	8	3,3	0,056	0,036	1,427
31	38	7	2,9	0,049	0,031	1,248
32	38	6	2,5	0,042	0,027	1,070
33	38	5	2,1	0,035	0,022	0,892
34	38	4	1,7	0,028	0,018	0,713
35	38	3	1,3	0,021	0,013	0,535
36	38	2	0,3	0,014	0,009	0,357
37	38	1	0,4	0,007	0,004	0,178
38	38	0	0,0	0,000	0,000	0,000

(continua)

TABELA 2 (continuação)

Estudo para determinar a temperatura da água de resfriamento do sistema.

Taf (°C)	Taq (°C)	ΔT (°C)	P (kW)	Consumo (kwh/min)	Custo (R\$/min)	Custo (R\$/dia)
39	38	0	0,0	0,000	0,000	0,000
40	38	0	0,0	0,000	0,000	0,000
41	38	0	0,0	0,000	0,000	0,000

Fonte: Elaborada pelos autores.

Conforme Tabela 2, a temperatura da água de resfriamento do sistema que gera a maior economia monetária é justamente a temperatura de utilização da água para o banho. As temperaturas acima da utilização não geram mais ganhos econômicos e aumentam as perdas térmicas durante o transporte e armazenamento da água até sua utilização, necessitando também de um misturador para alcançar a temperatura ideal para o uso, sendo esta a que representa o maior conforto térmico.

Isso mostra que o ideal é sempre aquecer a água até a temperatura que será utilizada posteriormente, evitando gastos com aquecimentos desnecessários, maiores perdas térmicas por radiação e convecção, aumento do custo com tubulações próprias para trabalhar com temperaturas mais elevadas e misturadores de água quente com fria para atingir a temperatura desejada, reduzindo significativamente os gastos para se ter um sistema de aquecimento solar. Outra vantagem de se trabalhar com temperaturas mais baixas é a possibilidade de utilizar a mesma tubulação de água fria já presente na residência. Como pode ser visto na Figura 2, a tubulação de PVC convencional pode trabalhar até 45 °C, reduzindo somente a pressão de trabalho com um coeficiente de segurança.

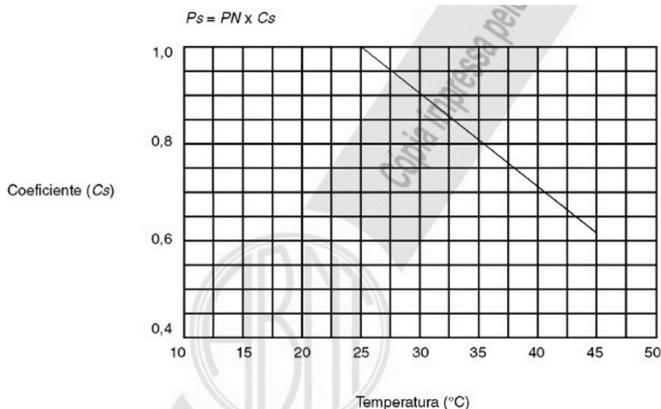


Figura 2 Coeficiente de segurança para correção da pressão de serviço em função da temperatura da água.

Fonte: Elaborada pelos autores a partir dos dados da Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998).

Na Tabela 3, é possível analisar a perda de eficiência do módulo fotovoltaico conforme a temperatura deste se eleva em razão da radiação incidente sobre ele. Quando o módulo se encontra a 25 °C, não apresenta perdas de eficiência nem ganhos por estar na temperatura padrão de teste STC, porém, quando está em temperaturas mais baixas, apresenta um ganho de eficiência, gerando mais energia com a mesma radiação incidente (BELOTO, 1983).

TABELA 3

Estudo da perda de eficiência em relação à temperatura do painel.

Taf (°C)	Eficiência	Potência (KWp)	Energia/dia (kWh/dia)	Custo devido à redução de Pot. (RS/dia)	Delta de Custo (RS/dia)
10	6,75%	0,107	0,411	-0,263	4,731
11	6,30%	0,100	0,384	-0,246	4,570
12	5,85%	0,093	0,356	-0,228	4,409
13	5,40%	0,086	0,329	-0,210	4,248
14	4,95%	0,079	0,301	-0,193	4,087
15	4,50%	0,072	0,274	-0,175	3,927
16	4,05%	0,064	0,247	-0,158	3,766
17	3,60%	0,057	0,219	-0,140	3,605
18	3,15%	0,050	0,192	-0,123	3,444
19	2,70%	0,043	0,164	-0,105	3,283
20	2,25%	0,036	0,137	-0,088	3,123
21	1,80%	0,029	0,110	-0,070	2,962
22	1,35%	0,021	0,082	-0,053	2,801
23	0,90%	0,014	0,005	-0,035	2,640
24	0,45%	0,007	0,027	-0,018	2,479
25	0,00%	0,000	0,000	0,000	2,319
26	-0,45%	-0,007	-0,027	0,018	2,158
27	-0,90%	-0,014	-0,055	0,035	1,997
28	-1,35%	-0,021	-0,082	0,053	1,836
29	-1,80%	-0,029	-0,110	0,070	1,675
30	-2,25%	-0,036	-0,137	0,088	1,514
31	-2,70%	-0,043	-0,164	0,105	1,354
32	-3,15%	-0,050	-0,192	0,123	1,193
33	-3,60%	-0,057	-0,219	0,140	1,032
34	-4,05%	-0,064	-0,247	0,158	0,871
35	-4,50%	-0,072	-0,274	0,175	0,710
36	-4,95%	-0,079	-0,301	0,193	0,550
37	-5,40%	-0,086	-0,329	0,210	0,389
38	-5,85%	-0,093	-0,356	0,228	0,228
39	-6,30%	-0,100	-0,384	0,246	0,246

(continua)

TABELA 3 (continuação)

Estudo da perda de eficiência em relação à temperatura do painel.

Taf (°C)	Eficiência	Potência (KWp)	Energia/dia (kWh/dia)	Custo devido à redução de Pot. (RS/dia)	Delta de Custo (RS/dia)
40	-6,75%	-0,107	-0,411	0,263	0,263
41	-7,20%	-0,114	-0,438	0,281	0,281
42	-7,65%	-0,122	-0,466	0,298	0,298
43	-8,10%	-0,129	-0,493	0,316	0,316
44	-8,55%	-0,136	-0,521	0,333	0,333
45	-9,00%	-0,143	-0,548	0,351	0,351
46	-9,45%	-0,150	-0,575	0,368	0,368
47	-9,90%	-0,157	-0,603	0,386	0,386
48	-10,35%	-0,165	-0,630	0,403	0,403

Fonte: Elaborada pelos autores.

À primeira vista, tem-se a impressão de que seria melhor manter o painel com a menor temperatura possível circulando o máximo de água pelo sistema de resfriamento, porém, como a finalidade do sistema não é somente manter o módulo com a menor temperatura e sim utilizar a energia que não pode ser convertida em energia elétrica pelo módulo como energia térmica em uso posterior, chega-se à conclusão de que é necessário relacionar a economia gerada pela diminuição do uso do chuveiro elétrico com a perda de eficiência do painel e utilizar a temperatura que apresentar maior economia financeira.

Para facilitar essa análise, foram gerados gráficos no *software* Excel[®] mostrando os valores obtidos nas tabelas; na Figura 3, é possível ver a redução dos gastos com energia elétrica conforme a água é aquecida pelo sistema de resfriamento e tem sua temperatura elevada até a de utilização. Após atingir o valor ideal, os ganhos econômicos são zerados, pois não apresentam maiores reduções de consumo de energia.

Na Figura 4 pode-se verificar os ganhos e as perdas de eficiência dos painéis fotovoltaicos conforme a variação da sua temperatura ocorre, com base no coeficiente de P_{max} , gerando um aumento na potência de saída para temperaturas menores do que 25 °C com base no padrão STC e redução para temperaturas acima desse valor.

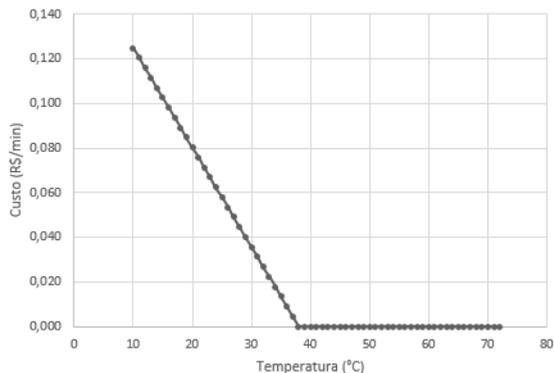


Figura 3 Redução dos gastos para aquecimento quando utilizado o sistema híbrido.

Fonte: Elaborada pelos autores.

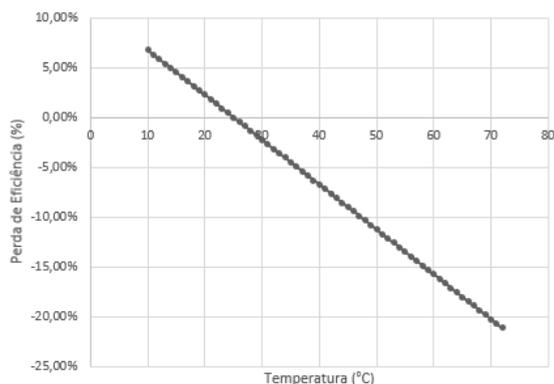


Figura 4 Perda de eficiência dos módulos fotovoltaicos em relação à sua temperatura de trabalho.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para se obter a melhor temperatura de trabalho do sistema, foi necessário relacionar a maior economia gerada com o aquecimento da água pelos painéis com os ganhos de eficiência obtidos pela redução da temperatura de trabalho dos módulos. Essa relação foi possível pelo fator comum em ambos os estudos, a economia gerada nos dois casos. Na Figura 5, é possível verificar o ponto de mínimo dessa relação, fornecendo a temperatura que apresenta maior economia, objetivo deste artigo.

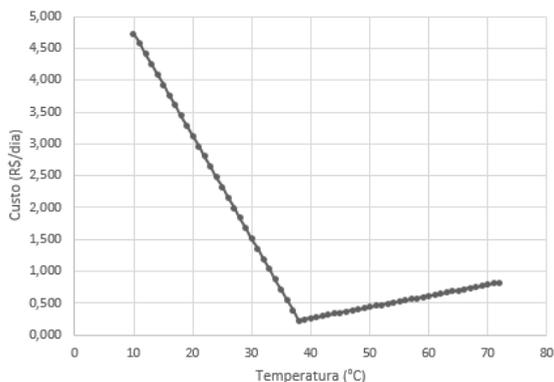


Figura 5 Relação do custo para aquecimento com o custo da redução de potência do painel em função da temperatura.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Analisando o gráfico, verificou-se que a temperatura que apresenta o maior ganho econômico é a temperatura de utilização final, de 38 °C, proporcionando um custo aproximado de R\$ 0,23 para suprir as necessidades diárias de água quente da residência em estudo. Após 25 °C, as perdas de potência do painel começam a surgir, gerando menos energia e, conseqüentemente, menor retorno financeiro. Para temperaturas acima da temperatura ideal de utilização não se tem mais economia com a redução do uso do chuveiro elétrico e o sistema só apresenta gastos.

Desenvolver o projeto estrutural do rastreador solar foi de grande importância para este estudo, pois somente assim é possível analisar a eficiência do sistema de rastreamento solar com reaproveitamento térmico e compará-lo com os sistemas fotovoltaicos convencionais disponíveis no mercado, verificando se há ganho econômico e energético ao utilizar o sistema aqui proposto.

O Sol nasce a Leste e se põe a Oeste no hemisfério Sul, movimentando-se com uma velocidade angular de 15°/hora. Para indicar a localização dele durante o dia, é utilizado o ângulo de Azimute, um ângulo de 0°, indicando que o Sol está apontando para o Norte, 90° para Leste e 270° para Oeste (MESSENGER; VENTRE, 2010; VILLALVA, 2015). Isso gera uma variação de 180 graus durante o dia, porém nas primeiras horas da manhã e nas horas finais da tarde ele está muito baixo no horizonte, tendo uma grande massa de ar para atravessar, fazendo com que um rastreamento completo seja desnecessário, uma vez que a intensidade da radiação solar diminui conforme a massa de ar aumenta, seguindo a Equação (1).

$$I_{DN} = 1353 \cdot \left[(1 - ab) 0,7^{MA^{0,678}} + ab \right] \quad (1)$$

Sendo I_{DN} a intensidade em um plano perpendicular aos raios solares em W/m^2 e MA é a massa de ar em kg, o valor de $1.353 W/m^2$ é a constante solar e o número 0,7 deve-se ao fato de que somente 70% da radiação incidente na atmosfera é transmitido para a Terra. O termo de 0,678 é uma aproximação empírica que leva em conta a não uniformidade das camadas atmosféricas e o fator a que multiplica a altura do local, representada com a letra h em metros, equivale a 0,14 (SOLAR, 2013).

A massa de ar é o comprimento normalizado que a luz leva através da atmosfera para o caminho mais curto possível, que ocorre quando o Sol está alinhado perpendicularmente ao solo, representado por X na Figura 6, apresentando nessa condição valor de massa de ar igual a 1. Ela quantifica a redução de potência luminosa à medida que passa através da atmosfera e é absorvida pelo ar e pela poeira, tendo valor igual ao inverso do cosseno do ângulo formado entre a vertical e o Sol no momento observado, como pode ser visto na Figura 6.

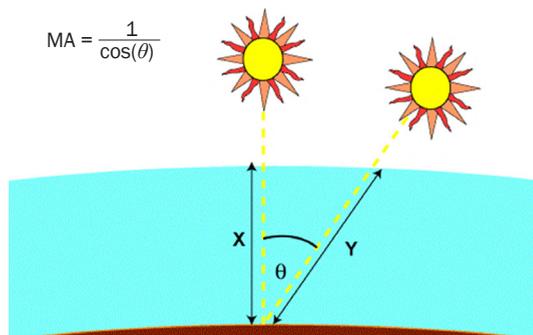


Figura 6 Representação da massa de ar que a luz deve passar antes de chegar à superfície.

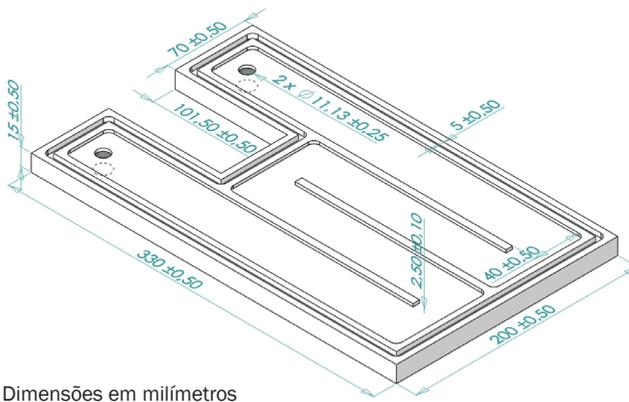
Fonte: Elaborada pelos autores a partir de dados de "Solar radiation on a tilted surface" (2013).

Após a análise desse conceito, foi definido que o rastreador teria 120° de amplitude, sendo 60° a partir da vertical para cada lado. Esse ângulo representa uma massa de ar com valor igual a 2 e um coeficiente de redução de potência incidente de 0,866 quando o Sol estiver baixo no céu, no início do dia, aumentando gradualmente até chegar em 1 quando o sistema estiver alinhado com ele e seguindo assim até o final do curso de rastreamento do sistema, voltando a reduzir até o Sol se pôr.

O protótipo foi desenhado em *software* CAD e teve como ponto de partida os componentes disponíveis no mercado, como o painel fotovoltaico de $10 Wp$, o motor elétrico de corrente contínua, as engrenagens de dentes retos e o parafuso sem fim. Com isso, foi possível ter uma noção dimensional do protótipo e, em seguida, iniciou-se o desenho dos elementos de composição do redutor, como a caixa, os mancais e as buchas, entre outros.

O trocador térmico do painel foi desenvolvido com base nas seguintes premissas: permitir contato direto da água com a parte traseira do painel, ter vedação nas bordas evitando vazamentos, ser aplicável no painel comercial sem modificações no mesmo. A espessura da chapa do trocador foi definida com o objetivo de atingir as premissas e alojar um conector rápido para mangueira de poliuretano com rosca ¼ NPT.

O trocador térmico foi fabricado em polietileno de alta densidade com 15 mm de espessura com um rebaixo interno de 2,5 mm de profundidade, comportando aproximadamente 96 ml de água, conforme pode ser verificado na Figura 7.



Dimensões em milímetros

Figura 7 Trocador térmico para painel fotovoltaico.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Em seguida, a estrutura do sistema de rastreamento foi projetada visando unir o trocador térmico com o módulo fotovoltaico, permitindo que o sistema rotacionasse 120° e acoplasse o redutor projetado. Para a base do painel e o sistema de união do trocador térmico, foram utilizadas chapas de aço cortadas a laser, com 1,5 mm de espessura.

Com todas as peças projetadas foi possível realizar uma montagem do conjunto, a fim de verificar possíveis ajustes e também simular a montagem física dos componentes e funcionamento do sistema. O desenho de conjunto pode ser conferido na Figura 8.

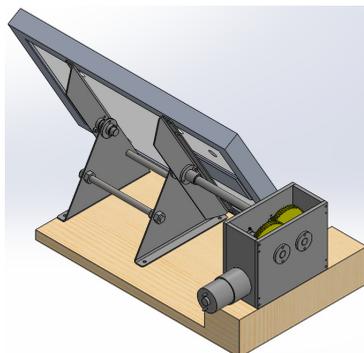


Figura 8 Montagem do conjunto.

Fonte: Elaborada pelos autores.

O sistema realiza o rastreamento do Sol em apenas um eixo, através de fotorresistores e PWM, para controle da velocidade do motor, a qual será constante após estar posicionado perpendicularmente ao Sol. Outra função será a medição da temperatura ambiente, da temperatura do painel, da temperatura de entrada da água e da temperatura de saída da água, para que com esses dados seja possível calcular a energia térmica total recebida pela água e verificar a eficácia do sistema.

O esquema elétrico do circuito utilizado é mostrado na Figura 9. A placa é composta de um microcontrolador ATmega2560 de 8 bits com resolução ADC de 10 bits e opera a uma frequência de 16 MHz, cuja função é receber os sinais dos sensores, realizar os cálculos necessários e controlar ativamente o motor do sistema de rastreamento solar. Os sensores de temperatura são do tipo NTC e os sensores de luminosidade consistem em LDRs, ambos variam o valor de resistência conforme a variação da grandeza que está sendo medida, dessa forma, a tensão das portas analógicas muda e o microcontrolador é capaz de calcular e interpretar o valor recebido dos sensores conforme a curva característica de cada um. As chaves Leste e Oeste são micro *switch* com alavanca flexível e tem como função indicar o fim de curso de rastreamento em ambas direções. Os sensores nomeados *CorrFixo* e *CorrRast* são sensores de corrente que, juntamente com o circuito divisor de tensão, fornecem valores para o cálculo da potência gerada dos painéis em estudo.

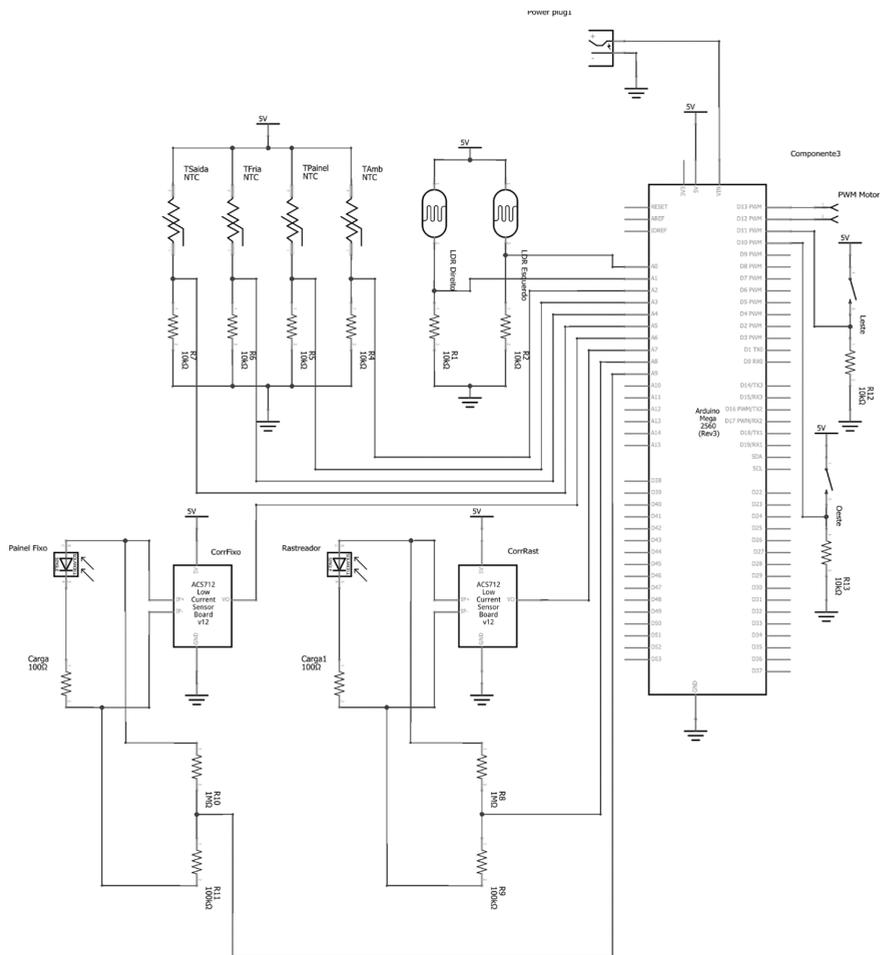


Figura 9 Circuito elétrico da placa controladora.

Fonte: Elaborada pelos autores.

A fim de possibilitar que o motor rotacione no sentido horário e anti-horário, uma ponte H foi desenvolvida, permitindo controlar o sentido e a velocidade do motor via programação no microcontrolador, e seu esquema pode ser verificado na Figura 10.

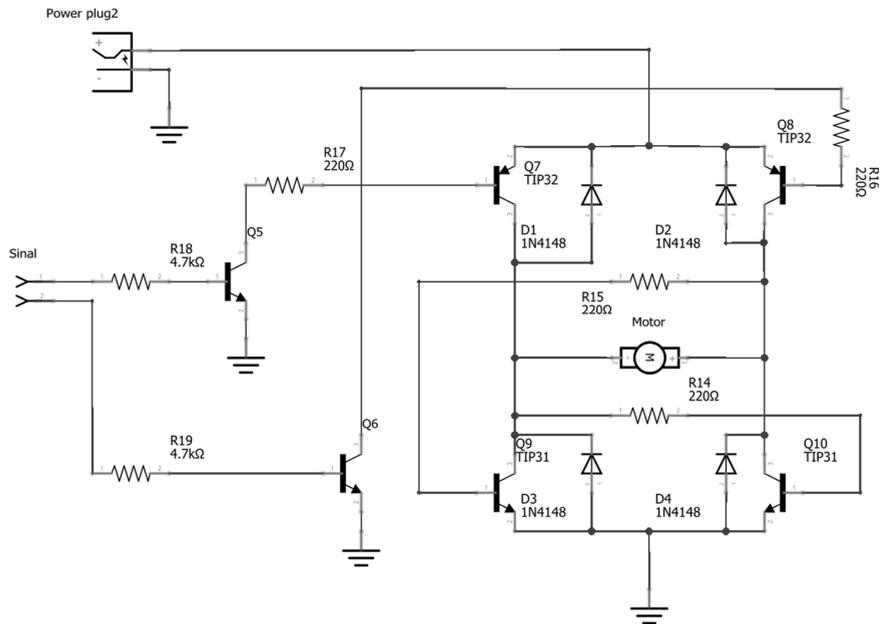


Figura 10 Circuito elétrico da ponte H.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para guiar e facilitar o desenvolvimento da programação de rastreamento do Sol, que será gravada no microcontrolador, foi criado um fluxograma. Nele está presente a leitura dos sensores Leste e Oeste, que são chaves de contato fixadas nas extremidades da base do rastreador e servem como sensores fim de curso para o painel, para a leitura dos sensores de luz e para o controle de velocidade do motor, como pode ser verificado na Figura 11.

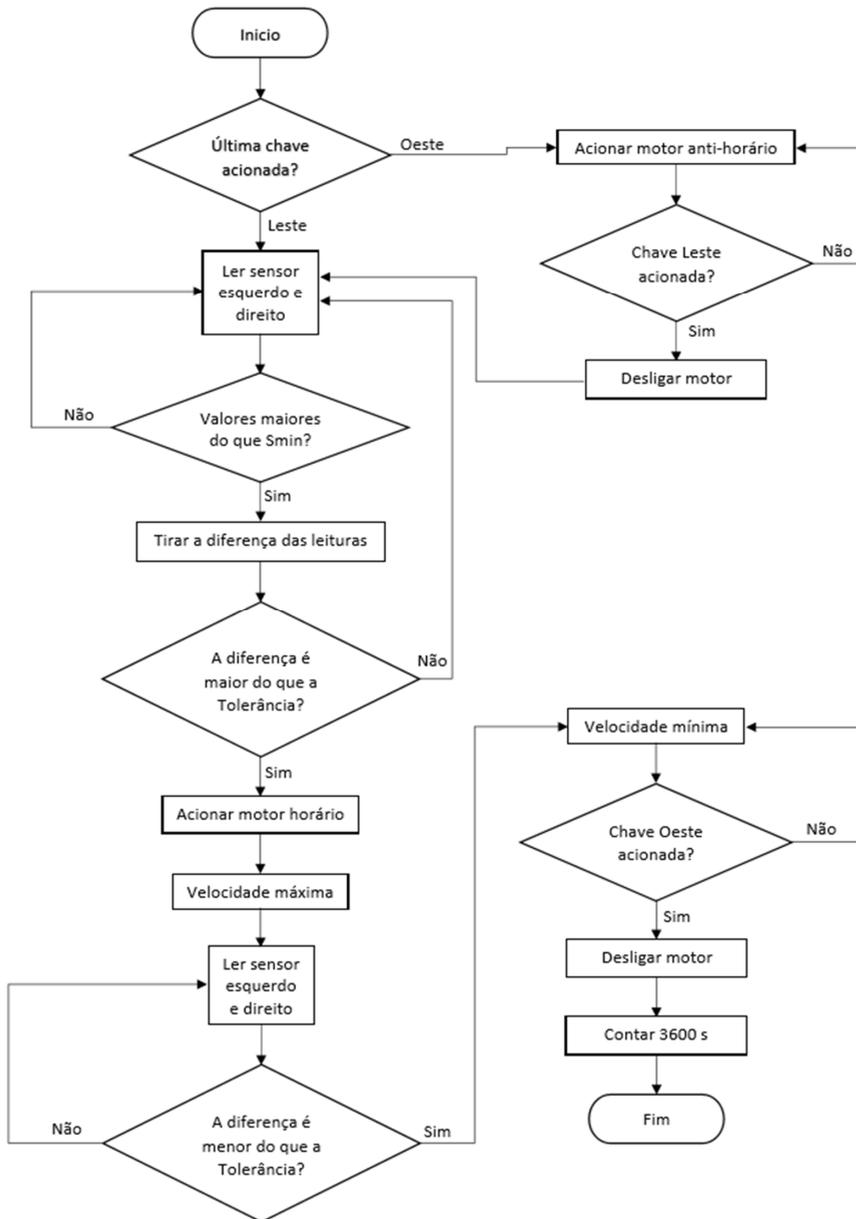


Figura 11 Fluxograma de rastreamento.

Fonte: Elaborada pelos autores.

A sequência de programação funciona do seguinte modo, primeiramente é realizada a leitura das chaves fim de curso para saber qual foi a acionada, e, caso tenha sido a Oeste, o motor é acionado em sentido anti-horário, fazendo com que o painel retorne para a posição inicial de rastreamento até que a chave Leste seja acionada. Ao acionar a chave Leste, o processador realiza a leitura dos sensores de luminosidade, verificando se estes estão com valores maiores do que o mínimo definido, e, após essa verificação, é calculada a diferença entre os sensores, e, caso o sensor Leste tenha valor maior que a tolerância definida, o motor é acionado em velocidade máxima até que a diferença entre os sensores fique menor que a tolerância, indicando que o painel está perpendicular ao Sol e colocando o motor em velocidade constante até que a chave Oeste seja acionada e o ciclo se reinicie.

Para validar os conceitos apresentados neste artigo, o protótipo foi montado e instrumentado, gerando dados de temperatura, corrente e tensão. Esses dados foram posteriormente analisados, a fim de comprovar os benefícios do sistema desenvolvido.

2.3 Ensaios

2.3.1 *Objetivos do 1º ensaio*

O primeiro teste teve como objetivo: coletar dados de temperatura ambiente, temperatura da água na entrada do sistema, temperatura da água na saída do sistema, temperatura do painel fixo e temperatura do painel com trocador térmico; coletar dados de corrente e tensão do painel fixo e coletar dados de corrente e tensão do painel com trocador térmico.

2.3.2 *Procedimento experimental do 1º ensaio*

O microprocessador utilizado para o teste foi o ATmega328P-PU, que possui seis portas analógicas, por isso algumas funções foram suprimidas, porém sem fugir do ideal do projeto que era o teste do sistema com reaproveitamento térmico quando comparado a um painel convencional. Para isso, o sistema de rastreamento foi removido, nesse primeiro teste, com as medições de temperatura ambiente e da água fria, porém, para não prejudicar o teste, essas temperaturas foram medidas nos mesmos intervalos de tempo de leitura do controlador, com o auxílio de um multímetro digital Icel Manaus, modelo MD-1700, equipado com um termopar do tipo K, com sensibilidade de $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$; segundo o fabricante, os valores coletados foram registrados para compor a análise do sistema.

A fim de garantir a correta medição dos valores de temperatura realizadas pelo multímetro, o termopar foi aferido utilizando gelo e água em ebulição, e, ao medir a temperatura do gelo, este apresentou uma leitura de aproximadamente 0°C , e, ao medir a água em ebulição, apresentou 99°C .

O teste foi conduzido em um dia com boa insolação e céu limpo com algumas nuvens pela manhã, porém, com o passar das horas, muitas nuvens começaram a se formar e o teste foi interrompido para não prejudicar os resultados obtidos. Os dois painéis estavam dispostos lado a lado, ambos com inclinação de 23° em relação à horizontal e utilizando uma lâmpada incandescente automotiva de 10 W como carga. Uma válvula de controle de fluxo foi utilizada para restringir a quantidade de fluido que atravessaria o sistema, e, para se ter conhecimento da vazão, o tempo foi medido até que toda a água do reservatório tivesse passado pelo trocador. Após seis medições, a média foi calculada, resultando em uma vazão de aproximadamente 0,1 l/min. Os valores de tensão e corrente lidos pelos sensores possibilitou o cálculo da potência de cada módulo em teste e somente esse valor era mostrado pelo controlador.

A água de resfriamento estava contida em um reservatório disposto a 1,5 m acima do painel fotovoltaico. Na base do reservatório, havia um orifício com um conector de engate rápido e uma tubulação de 6 mm conectada a uma válvula de controle de fluxo que permanecia fechada até o início dos testes; uma outra tubulação conectava o trocador térmico à válvula, permitindo que a água fluísse para o rebaixo interno do trocador; um conector de engate rápido disposto opostamente ao anterior permitia a saída da água do sistema e a mesma seguia por uma tubulação até o sensor NTC; a temperatura medida por esse sensor foi denominada *Trastreador*; após o sensor, a água era descartada através de uma tubulação disposta a uma altura inferior à da base do sistema de rastreamento.

2.3.3 *Objetivos do 2º ensaio*

O segundo teste teve como objetivo: coletar dados de corrente e tensão do painel fixo e coletar dados de corrente e tensão do painel com trocador térmico e sistema de rastreamento solar.

2.3.4 *Procedimento experimental do 2º ensaio*

Esse teste foi executado em um dia diferente do teste anterior, no período da manhã, com o painel fixo e o painel com rastreador. O sistema de rastreamento foi testado com uma inclinação de 23° com a horizontal, bem como o painel fixo. Ao utilizar uma inclinação com ângulo igual à latitude, tem-se um melhor aproveitamento da radiação incidente ao longo do ano, apresentando um bom desempenho no verão, período com maior incidência solar, e um aumento de cerca de 40% no inverno se comparado a um sistema fixado paralelamente com a horizontal (REPRESENTAÇÃO, 2013).

Os sensores de luminosidade estavam posicionados na parte superior do painel, separados por uma lâmina de 8 cm de altura por 3 cm de largura, com função gerar sombra sobre os sensores, no caso da face do painel não estar perpendicular ao Sol, e podem ser conferidos na Figura 12.



Figura 12 Teste do sistema de rastreamento.

Fonte: Elaborada pelos autores.

3 RESULTADOS

Com os dados coletados nos ensaios foi possível montar uma planilha de valores e gerar gráficos, a fim de melhorar a visualização e demonstrar os ganhos obtidos com a utilização do sistema de reaproveitamento térmico.

O primeiro dado analisado foi a temperatura obtida, em que foram coletadas cinco temperaturas, sendo elas: temperatura ambiente, do painel fixo, do painel com trocador térmico, da água fria e da água após passar pelo sistema. A Figura 13 mostra o gráfico da temperatura em função da hora do dia.

A temperatura ambiente, a temperatura da água fria e a temperatura do painel fixo (*T_{fixo}*) foram medidas utilizando um termopar do tipo K, com erro de $\pm 1,1$ °C, conectado a um multímetro com resolução de 1 °C. Já a temperatura do painel com trocador térmico (*Trastreador*) e a temperatura da água que atravessava o sistema foram realizadas com o auxílio do Arduino® e, com um sensor de temperatura do tipo NTC com precisão de 1,5 °C, as leituras tinham resolução de 0,1 °C.

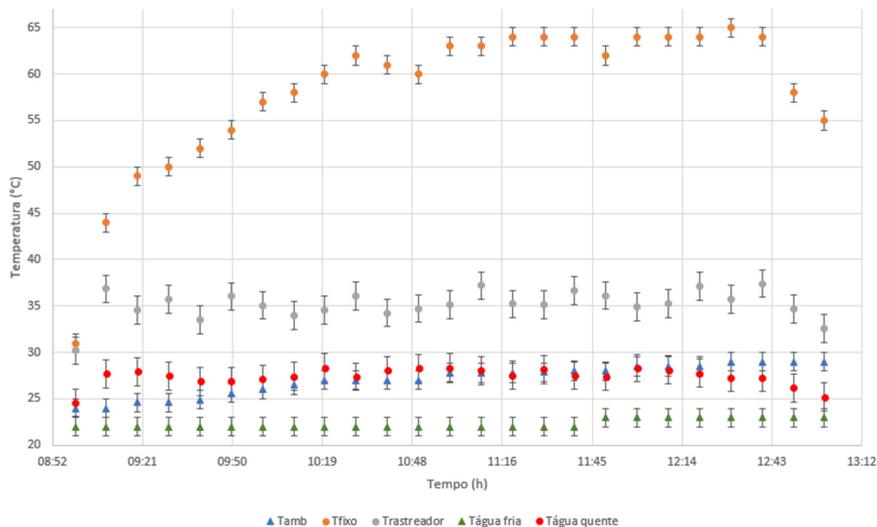


Figura 13 Temperaturas registradas durante o primeiro teste.

Fonte: Elaborada pelos autores.

É possível verificar que a temperatura do painel fixo, o qual não tinha um sistema para remover a carga térmica recebida pelo Sol, se eleva rapidamente até atingir uma temperatura de equilíbrio em torno dos 62 °C, bem acima dos 27 °C de média da temperatura ambiente. Esse valor elevado, além de gerar uma redução significativa da potência elétrica gerada, também reduz a vida útil da célula fotovoltaica, pois aumenta sua degradação.

O segundo dado analisado foi a potência elétrica gerada pelo painel fotovoltaico, e para isso foram coletados os valores de tensão e corrente dos dois painéis em teste: o fixo era o painel sem o sistema de reaproveitamento térmico e o rastreador possuía o trocador de calor em sua parte traseira. Os dados coletados podem ser verificados no gráfico da Figura 14.

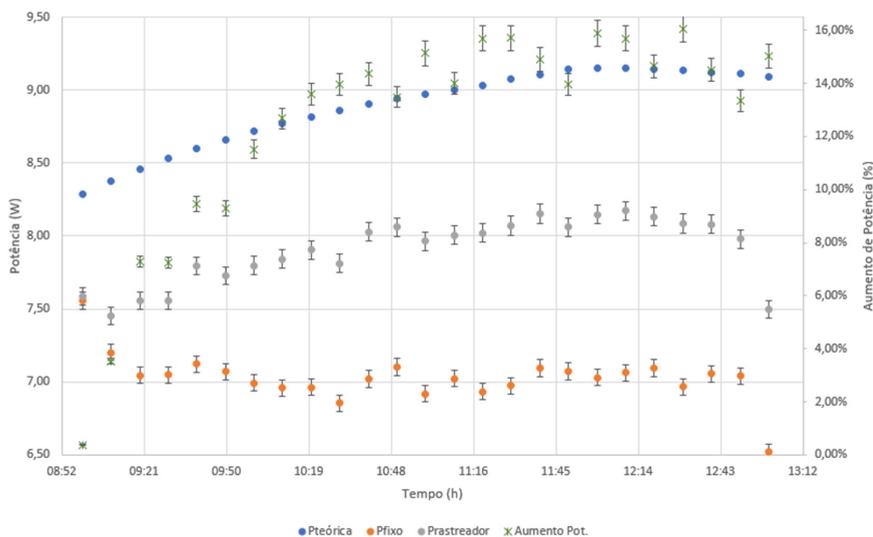


Figura 14 Potências elétricas registradas durante o primeiro teste.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com a tensão e a corrente de cada painel, foi possível calcular a potência dos mesmos e compará-las com a potência teórica, calculada conforme a Equação (2), baseada na irradiação local (*Idireta*) em W/m^2 no dia do ensaio, fundamentada em cálculos de posicionamento solar e massa de ar, a área (A_{painel}) em m^2 e a eficiência do painel (η_{painel}) em % (PINHO; GALDINO, 2014).

$$P_{teórica} = I_{direta} \cdot A_{painel} \cdot \eta_{painel} \quad (W) \quad (2)$$

A corrente foi medida com um microchip ACS712 com sensibilidade de 185 mV/A, e a tensão foi mensurada a partir de um divisor de tensão confeccionado com dois resistores, um de 1 M Ω e outro de 100 k Ω , possibilitando que o Arduino® realizasse medições de tensão em corrente contínua de até 50 V com sensibilidade de 0,054 V.

Os valores coletados mostraram um aumento de potência gerada, com média calculada de 12,46%, no sistema com reaproveitamento térmico em relação ao painel convencional; isso ocorre devido à menor temperatura de operação que o painel com trocador térmico se encontrava. Outro detalhe a ser analisado é que a potência gerada pelo painel convencional ficou mais constante mesmo com o aumento da radiação incidente, pelo fato de sua temperatura aumentar com a maior insolação e, conseqüentemente, ter sua potência reduzida, enquanto o sistema com reaproveitamento térmico teve um aumento de potência.

O terceiro dado analisado foi a potência total gerada pelo sistema, isto é, a potência elétrica e a potência térmica produzida pelo sistema com reaproveitamento térmico. A potência teórica foi calculada com base na radiação incidente, conforme explicado anteriormente, porém, dessa vez, não foi considerada a eficiência do painel fotovoltaico, pois se desejava saber o máximo que era possível gerar com a área do painel utilizado. Os dados foram coletados e plotados conforme o gráfico da Figura 15.

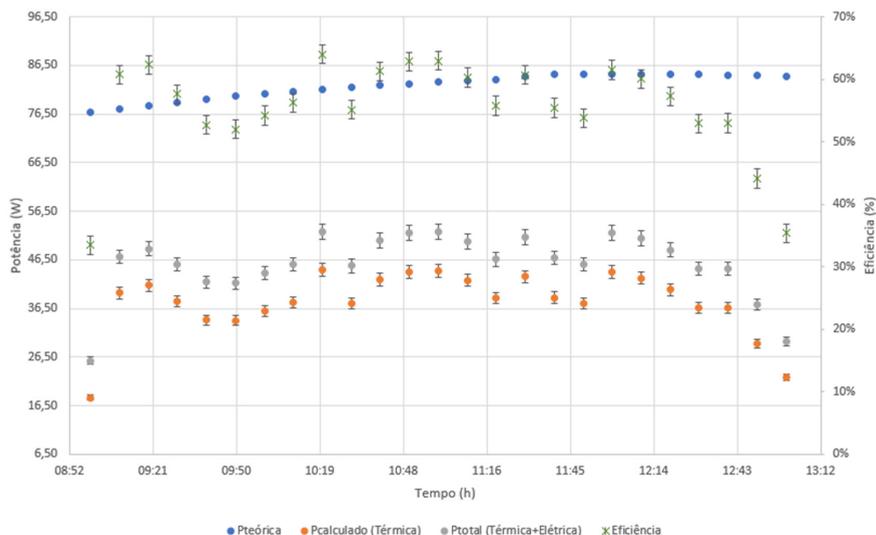


Figura 15 Potência total registrada durante o primeiro teste.

Fonte: Elaborada pelos autores.

A partir das temperaturas da água na entrada e na saída do sistema, conhecendo-se a vazão calculada de 100 ml/min, foi possível calcular a potência térmica gerada pelo trocador de calor instalado no módulo fotovoltaico, utilizando a Equação (3). Posteriormente, foi somada a potência elétrica para se obter a potência total gerada pelo sistema, o que permitiu calcular a eficiência total do sistema que obteve uma média de 55%, valor este muito superior aos 10,8% de eficiência teórica do painel fotovoltaico. Isso ocorre porque está sendo aproveitado todo o espectro da luz solar, as células fotovoltaicas somente transformam em energia elétrica as baixas frequências e o restante era transformado em energia térmica e dissipada pelo ambiente, o que reduzia significativamente a potência elétrica gerada pelo módulo.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (J) \quad (3)$$

O sistema proposto neste artigo, além de gerar maior potência elétrica por reduzir a temperatura de trabalho do módulo, também aproveita a energia térmica, utilizando todo o espectro solar, armazenando-a para uso posterior nas tarefas residenciais ou industriais que necessitem de água quente para algum processo. Outro benefício desse sistema é a possibilidade de concentração de luz solar no módulo fotovoltaico, pois, como a carga térmica será removida do painel para uso posterior, os efeitos gerados pelo aumento da temperatura não ocorrerão e, quanto maior a incidência solar sobre as células, mais energia elétrica pode ser gerada pela mesma quantidade de células, reduzindo consideravelmente os custos de um sistema solar fotovoltaico.

O segundo teste foi realizado com o objetivo de testar e analisar o aumento de eficiência do sistema, utilizando o rastreador solar e o trocador de calor simultaneamente. Nesse teste, foi possível verificar a precisão de posicionamento do sistema de rastreamento, o consumo do motor elétrico do rastreador e o ganho de potência do módulo fotovoltaico. Os dados foram coletados e impressos na Figura 16.

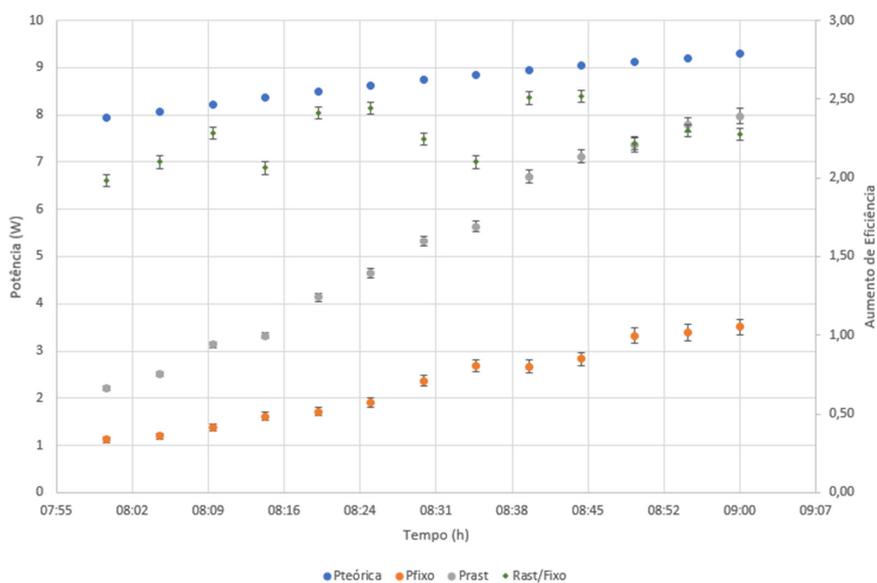


Figura 16 Potências coletadas no segundo teste.

Fonte: Elaborada pelos autores.

A potência teórica foi calculada com base na radiação direta teórica, explicada anteriormente na área do painel e em sua eficiência teórica. A potência do painel fixo e a potência do painel com o sistema de rastreamento foram coletadas utilizando os mesmos sensores dos testes anteriores.

É possível verificar no gráfico que o painel com rastreador tem um aumento significativo de potência no período do teste, aproximando-se da potência teórica, porém, no início, ela está bem abaixo desta. Isso se dá devido ao fato de o Sol ainda estar baixo no horizonte, fazendo com que pouca radiação direta chegue ao módulo, tendo sua potência gerada basicamente por radiação difusa; o sistema de rastreamento entrou em ação por volta das 8 horas e 30 minutos e seu consumo foi medido com o auxílio de um multímetro, apresentando cerca de 0,5 W de potência consumida quando o sistema entrou em regime permanente, e os valores da potência do rastreador foram decrescidos nesse valor para mostrar somente os valores de potência útil.

Durante esse teste, foi utilizado o trocador térmico com uma vazão de água de aproximadamente 2 litros por minuto, a fim de verificar os ganhos do painel por deixá-lo trabalhar na menor temperatura possível; a água de saída era coletada e depois recolocada no reservatório superior para recircular pelo sistema. A utilização dos sistemas propostos neste trabalho fez com que o painel tivesse um aumento médio de 2,27 vezes em sua eficiência quando comparado a um módulo fotovoltaico convencional com inclinação igual à latitude do local de instalação, fazendo com que chegasse próximo à eficiência teórica fornecida pelo fabricante, gerando uma quantidade significativamente maior de potência.

4 CONCLUSÕES

Com a construção de um protótipo reduzido, foi possível comprovar os benefícios do reaproveitamento da carga térmica incidente sobre o módulo fotovoltaico, gerando cerca de 12,5% mais energia elétrica do que um painel convencional arrefecido por convecção natural sob mesmas condições climáticas. Esse aumento ocorreu em razão da menor temperatura de trabalho do painel com trocador térmico, reduzindo as perdas de potência.

O sistema de rastreamento apresentou um bom desempenho, pois manteve o painel perpendicularmente ao Sol durante o teste, tendo como diferencial uma programação que localiza a posição do Sol uma única vez e depois segue em velocidade constante, reduzindo significativamente o consumo energético devido à restrição de movimentação desnecessária quando há presença de nuvens, por exemplo, que causam erros de leitura nos sensores por criar pontos de maior luminosidade que não refletem a verdadeira posição solar. Outro aspecto deste projeto é o modo de retorno à posição inicial do painel, que é realizado com baixa velocidade durante todo o período noturno, reduzindo ruídos e altos picos de consumo de energia.

Se considerada também a energia térmica captada pelo trocador de calor na parte traseira do painel, o sistema aqui proposto gerou, em média, 6,5 vezes mais energia do

que um módulo fotovoltaico convencional disponível no mercado testado sob as mesmas condições de exposição solar.

SOLAR TRACKER FOR PHOTOVOLTAICS PANELS WITH HEAT RECOVERY

Abstract

This work carried out the development of a solar tracking system with simple construction and low energy consumption, reusing the residual thermal load incident over the photovoltaic module, increasing significantly the system efficiency and consequently the generated power. The prototype showed an electrical power increase of 12,5% and generated 6,5 times more energy when considered the reused thermal energy. This project presents a sustainable alternative to the country electrical energy generation and a better use of the available natural resources.

Keywords: Photovoltaic energy. Solar Tracker. Heat recovery.

REFERÊNCIAS

- AL-ROUSAN, N.; MATISA N. A.; MATDESA, M. K. Advances in solar photovoltaic tracking systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, Part 3, p. 2548-2569, Feb. 2018.
- ASSOCIAÇÃO Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. *NBR 5626/98: Instalação predial de água fria*. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- BELOTO A. F. *Estudo das características de células solares de silício monocristalino*. 1983. Dissertação (Mestrado em Física e Química) – Universidade de São Carlos, São Carlos, 1983.
- BELINAZO, M. L.; BELINAZO, H. J. Parâmetros do aquecimento de água em chuveiros: conforto e energia. *Revista eletrônica VIDYA*, v. 24, n. 41, p. 184, 2004.
- GARDENAL, I. O chuveiro na curva de consumo. *Jornal da Unicamp*, Campinas, SP, n. 594, p. 19-25, maio 2014. Elétrica, p. 7.
- FORDER, R. So Mr Prescott, how hot should my bath be? *The Telegraph*, 2005. Disponível em: <https://www.telegraph.co.uk/news/health/3318578/So-Mr-Prescott-how-hot-should-my-bath-be.html>. Acesso em: 10 jun. 2016.
- MESSENGER, R. A.; VENTRE, J. *Photovoltaic Systems Engineering*. 3. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.

NICLAS. Standard Test Conditions (STC): definition and problems. *Sino Voltaics*, 2011. Disponível em: <http://sinovoltaics.com/learning-center/quality/standard-test-conditions-stc-definition-and-problems/>. Acesso em: 15 dez. 2016.

PINHO J. T.; GALDINO M. A. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Ilha do Fundão: Cresesb, 2014.

SOLAR Radiation on a Tilted Surface. *PVEducation*, 2013. Disponível em: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-on-a-tilted-surface>. Acesso em: 5 fev. 2017.

REPRESENTAÇÃO da massa de ar que a luz deve passar antes de chegar na superfície. *PVEducation*, 2013. 1 desenho. Disponível em: http://www.pveducation.org/pvcdrom/2-properties-sunlight/air-mass#footnote3_ol91572. Acesso em: 12 nov. 2016.

SIECKER, J.; KUSAKANA, K.; NUMBI, B.P. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. ed. 79, p. 192-203, 2017.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. *Introdução a termodinâmica da engenharia química*. 5. ed. São Paulo: LTC, 2000.

THORAT, P A. *et al.* Effect of sun tracking and cooling system on photovoltaic panel: A Review. *Materials today. Proceedings*, v. 4, n. 14, p. 12630-12634, 2017.

VILLALVA, M. G. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações: Energia solar*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.

YINGLI. *JS 10 Series*. [S. l.], 2013. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FFile-1455890774.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2016.

Contato

Sérgio Luis Rabelo de Almeida
slrabelo@terra.com.br

Tramitação

Recebido em maio de 2018.
Aprovado em outubro de 2018.