

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA NA TENSÃO DE CURTO CIRCUITO A PARTIR DO CONTROLE TÉRMICO POR SISTEMA DE ARREFECIMENTO CONVECTIVO EM PAINEL FOTOVOLTAICO

FRANÇA¹, Mayara Cordeiro; CAVALCANTI², Luiz Antônio Pimentel

Resumo

Atualmente existe uma disseminação do sistema fotovoltaico On-Grid, após ótimos incentivos do governo. O número de novas conexões na rede de sistemas fotovoltaicos tem crescido de forma animadora para o cenário das fontes de energia alternativas. Entretanto, a potência de saída tem influência direta com a temperatura de funcionamento da placa. Como a eficiência de conversão de energia luminosa para energia elétrica não é superior a 20%, adequar o sistema para que seja o mais eficiente possível e assim gerar a potência máxima do sistema é ideal para garantir melhor aproveitamento da geração. Com o controle térmico a partir de um sistema de arrefecimento que despeja água sobre a superfície da placa e tem a finalidade de aumentar a troca térmica da placa por meio da convecção forçada gerada entre o fluido e a superfície, constatou-se um ganho na tensão de curto circuito (V_{oc}) maior que 1V e como consequência aumento da potência de saída do sistema.

Palavras-chave: Fontes Alternativas, Eficiência de placa fotovoltaica, Sistema de arrefecimento.

Abstract

Currently there is a spread of the photovoltaic system On-Grid, after great incentives from the government. The number of new connections in the network of photovoltaic systems has grown in an exciting way for the scenario of alternative energy sources. However, the output power has a direct influence on the operating temperature of the board. As the efficiency of converting light energy to electric energy is not more than 20%, adjusting the system to be as efficient as possible and thus generating the maximum power of the system is ideal to ensure better use of generation. With the thermal control from a cooling system that releases water on the surface of the plate and has the purpose of increasing the thermal exchange of the plate by means of the forced convection generated between the fluid and the surface, a gain in the tension shorting (V_{oc}) greater than 1V and consequently increasing the output power of the system.

Keywords: Alternative Sources, Photovoltaic system efficiency, Cooling system.

1- Instituto Federal de Educação Tecnológica da Bahia – IFBA, Graduação de Engenharia Elétrica, Paulo Afonso, BA, Brasil. [mayarcf@gmail.com]

2- Instituto Federal de Educação Tecnológica da Bahia – IFBA, Graduação de Engenharia Elétrica, Paulo Afonso, BA, Brasil. [luiz.cavalcanti@ifba.edu.br]

1. INTRODUÇÃO

O constante desenvolvimento no setor industrial mundial, e o aumento na utilização de equipamentos elétricos numa diversidade de atividades humanas fizeram com que a demanda por energia elétrica aumentasse em forma exponencial nas últimas décadas (MIRANDA, 2003). Atualmente a matriz energética mundial está composta, em sua grande maioria por combustíveis fósseis. Carvão, petróleo e gás natural são os responsáveis por 80% da geração mundial de energia (MME, 2007).

Essa grande dependência deste tipo de energia provocou, nas últimas décadas, mudanças climáticas a nível global. As emissões de gases como o dióxido de carbono, resultante da combustão de combustíveis de origem fósseis, tem provocado o aquecimento da atmosfera (efeito estufa). Além disso, os combustíveis fósseis são fontes de energia não renováveis. As reservas destas fontes de energia vão se esgotar em algum momento (SEGUEL, 2009).

A partir deste cenário energético global, verificou-se o início de um processo de profundas mudanças tecnológicas no setor elétrico, tendo como característica mais visível deste processo o ciclo expansionista de fontes renováveis e alternativas na matriz elétrica (RANK, 2016). Dentre as fontes alternativas, se destaca sem dúvida a energia solar fotovoltaica, por ser uma das fontes primárias menos poluente, silenciosa e estática; e por se adequar bem estruturalmente a várias condições, além de diminuir as perdas por ser uma geração distribuída, onde a carga está próximo da fonte.

Este artigo tem como objetivo analisar a tensão de curto circuito de um painel fotovoltaico a partir do controle térmico da superfície da placa realizado por sistema auxiliar de arrefecimento convectivo construído com materiais reciclados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

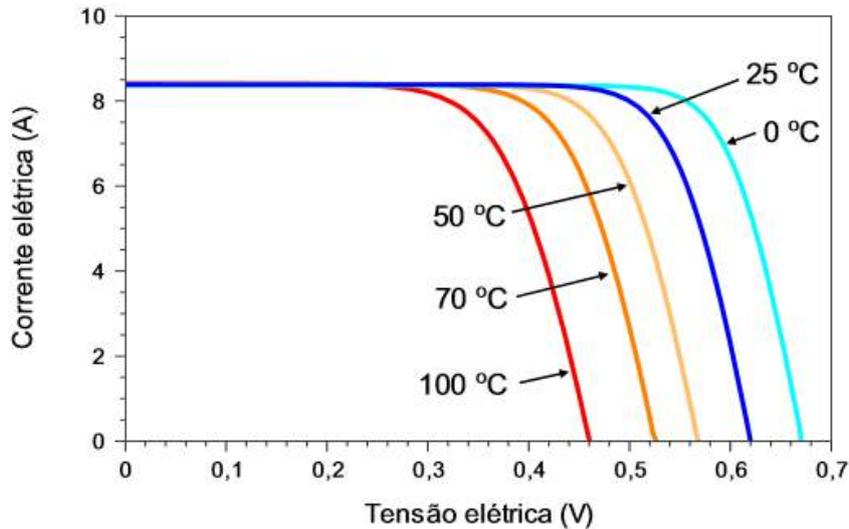
O desempenho real dos módulos fotovoltaicos é determinado pelas condições ambientais, as quais podem causar efeitos que se traduzem em perda de eficiência. Dentre os principais fatores críticos para o desempenho dos módulos destacam-se: a temperatura de operação, irradiação, espectro solar, acúmulo de sujeira e sombreamento. Estes fatores são capazes de reduzir a eficiência de conversão em até 15% e podem levar a degradação das células e módulos (SIMIONE, 2017).

Parâmetros com maior influencia

Existem dois parâmetros externos que mais afetam as características elétricas dos painéis fotovoltaicos: a irradiância solar e a temperatura. A irradiância solar é uma característica intrínseca a região de instalação das placas fotovoltaicas. O aumento da irradiância incidente e/ou da

temperatura ambiente produz um aumento da temperatura da célula, e conseqüentemente tende a reduzir a sua eficiência (PINHO e GALDINO, 2014). Como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Relação entre a tensão e a corrente em função da temperatura nas placas



. (FONTE: PINHO e GALDINO, 2014).

O modelo elétrico equivalente

A corrente em célula fotovoltaica pode ser considerada como a soma de corrente de uma junção *pn* no escuro (diodo semiconductor) com a corrente gerada pelos fótons absorvidos da radiação solar (PINHO e GALDINHO, 2014). Podendo ser descrita a partir da equação de Schockley de diodo, Equação 1:

$$I = I_L - I_0 \left[\left(e^{\frac{qV}{nkT}} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

Onde:

I_L – Corrente fotogerada (A);

I_0 – Corrente de Saturação reversa do diodo (A);

n – Fator de idealidade do diodo, número adimensional geralmente entre 1 e 2, obtido por ajuste de dados experimentais medidos;

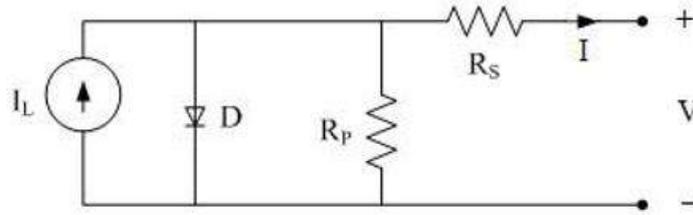
q – Carga do elétrons ($1,6 \times 10^{-19} \text{C}$);

k – Constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23} \text{j/K}$);

T – Temperatura absoluta.

Podemos observar a partir da Equação 1 que se I_L for zero a célula fotovoltaica se comportará como um diodo.

Figura 2 – Circuito equivalente com um diodo para célula fotovoltaica.



(FONTE: PINHO e GALDINHO, 2014)

Os componentes descritos na Figura 2 que descrevem os seguintes fenômenos, segundo Silva (2016):

R_s – Descreve as perdas ôhmicas do material semiconductor, nas conexões em geral;

R_p – Descreve as perdas que surgem principalmente através das perturbações elétricas causadas pelas impurezas e defeitos da estrutura cristalina;

I_L – representa a corrente a uma determina isolação;

D – a junção P-N;

V – A tensão de saída nos terminais da célula.

Como observado no circuito equivalente existe uma resistência em série - R_s devido a junção metal-semiconductor, malhas metálicas, regiões dopadas, etc e uma resistência em paralelo R_p proveniente de ponto de curto-circuito na junção pn, Equação 2.

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_S)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V-IR_S}{R_P} \quad (2)$$

Ao termo exponencial acrescentou a queda de tensão no resistor em série e a fórmula inicial foi diminuído a corrente relativa a resistência em paralelo. Para o modelo elétrico, estes termos podem ser considerados as perdas elétricas da placa fotovoltaica.

Uma única célula fotovoltaica, isoladamente, tem capacidade reduzida de produção de energia elétrica, tipicamente entre 1 e 2W, correspondente a uma tensão de 0,5V e uma corrente entre 2 e 4A. Portanto, para atingir determinados níveis de tensão e corrente, faz-se necessária a associação de várias células, através de ligações série e paralelo, formando os painéis fotovoltaicos (SEGUEL, 2009).

A Equação 2, segundo Gow e Manning (1999) apud Seguel (2009) irá sofrer as modificações apresentadas na Equação 3 a depender da quantidade de células conectadas em paralelo e em série:

$$I = n_P \left\{ I_L - I_0 \left[e^{\frac{q\left(\frac{V}{n_S} + \frac{IR_S}{n_P}\right)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{\frac{V}{n_S} - \frac{IR_S}{n_P}}{R_P} \right\} \quad (3)$$

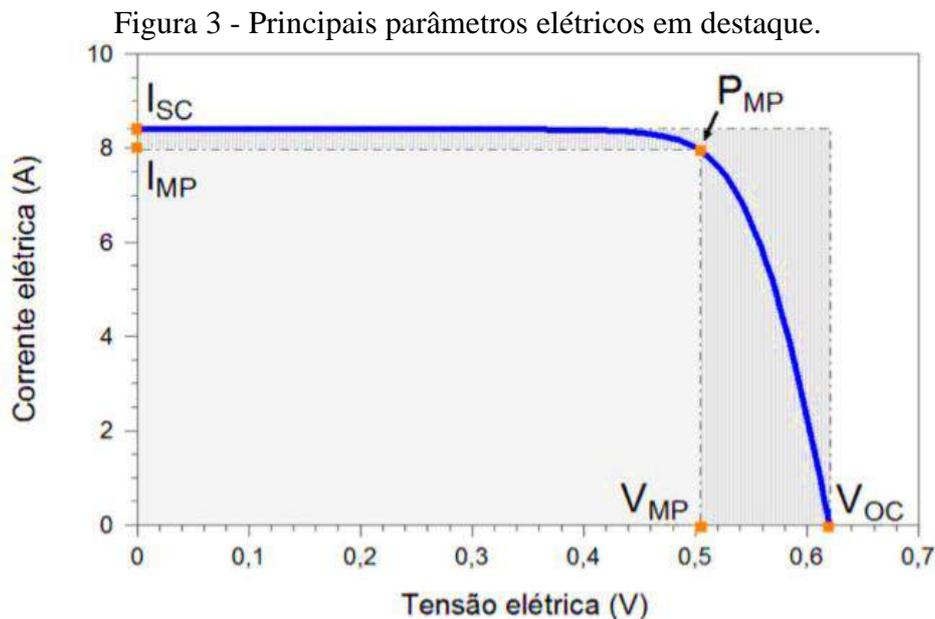
Onde:

n_p – Número de células conectadas em paralelo;

n_s – Número de células conectadas em série.

Parâmetros elétricos

A partir da Figura 3 que apresenta a curva I-V com os principais parâmetros elétricos que caracterizam os módulos fotovoltaicos: tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, fator de forma e eficiência (PINHO e GALDINHO, 2014).



(FONTE: PINHO e GALDINO, 2014)

- *Tensão de circuito aberto* (V_{oc}): é a tensão entre os terminais de uma célula fotovoltaica quando não há corrente elétrica circulando e é a máxima tensão que uma célula fotovoltaica pode produzir.

- *Corrente de curto-circuito* (I_{sc}): é a máxima corrente que se pode obter e é medida na célula fotovoltaica quando a tensão elétrica em seus terminais é igual a zero.

- *Fator de forma* (FF): é a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto circuito com a tensão de circuito aberto, Equação 4.

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (4)$$

- *Eficiência* (η): é o parâmetro que define quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica. Representa a relação entre a potência elétrica produzida pela célula fotovoltaica e a potência da energia solar incidente e pode ser definida como Equação 5:

$$\eta = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{AG} \times 100\% \quad (5)$$

Onde,

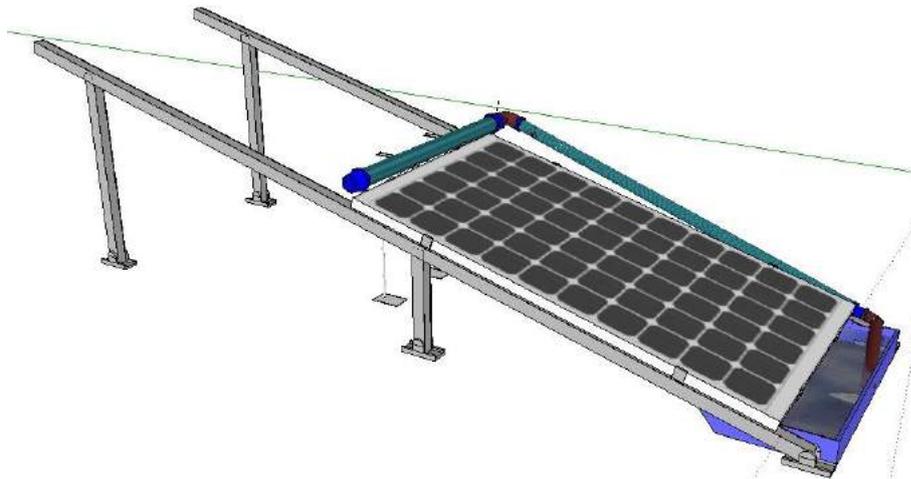
A (m²) é a área da célula;

G (W/m²) é a irradiância solar incidente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de arrefecimento foi confeccionado com uma bomba d'água do tipo *Submersible Pump*, modelo SP-500 de marca JAD com potência de 6W que consegue elevar a água até no máximo 60cm de altura. Utilizou-se um recipiente retangular plástico de dimensões 9x33x54cm para o reservatório d'água e uma mangueira de 150cm para despejar a água sobre a superfície da placa (Figura 4).

Figura 4: Sistema de resfriamento por película d'água protótipo montado no SketchUp Pro 2017.

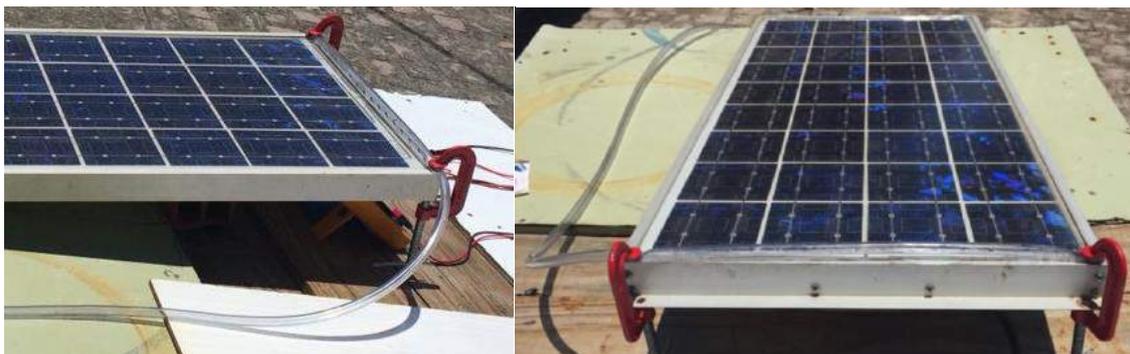


(FONTE: Autoria própria, 2017)

O principal componente para funcionamento do sistema é a bomba d'água de aquário que tem como função direcionar a água que está no reservatório inferior para a borda superior da placa, onde a mangueira é fixada como mostra a Figura 5, e assim despejar pela mangueira com furos de 2mm espaçados simetricamente a água despejada cria uma fina película d'água.

Ao protótipo criado no SketchUp, acrescentou-se um protótipo de torre de arrefecimento para aumentar a troca de calor da água com por meio de um sistema reutilizado de latinha de alumínio, Figura 6, através do material metálico aumenta da troca térmica.

Figura 5: Sistema de fixação da mangueira com furos espaçados regularmente.



(FONTE: Autoria própria, 2018)

Figura 6: Sistema de resfriamento montado a partir de latas de alumínio reutilizadas.



(FONTE: Autoria própria, 2018)

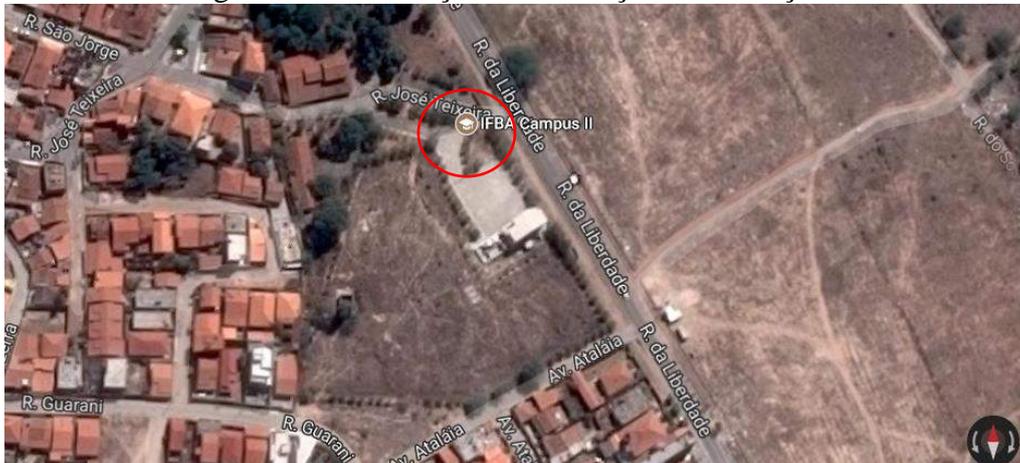
Para realizar a análise estatística do experimento utilizou-se o teste qui-quadrado (χ^2), que segundo CONTI (2009) é um teste de hipóteses que se destina a encontrar um valor da dispersão para duas variáveis nominais, avaliando a associação existente entre variáveis qualitativas. O princípio básico deste método é comparar proporções, isto é, as possíveis divergências entre as frequências observadas e esperadas para um certo evento. Evidentemente, pode-se dizer que dois grupos se comportam de forma semelhante se as diferenças entre as frequências observadas e as esperadas em cada categoria forem muito pequenas, próximas a zero. Este teste pode ser utilizado para:

- Verificar se a frequência com que um determinado acontecimento observado em uma amostra se desvia significativamente ou não da frequência com que ele é esperado.
- Comparar a distribuição de diversos acontecimentos em diferentes amostras, a fim de avaliar se as proporções observadas destes eventos mostram ou não diferenças significativas ou se as amostras diferem significativamente quanto às proporções desses acontecimentos.

Medições das Variáveis Elétricas

As medições foram realizadas no campus do Sal Torrado do IFBA na cidade de Paulo Afonso-BA. Sua localização, observada na Figura 7, possui latitude de $9,38170334^\circ$ S e longitude de 38.22547495° O e elevação de 254m, segundo dados do GOOGLE MAPS.

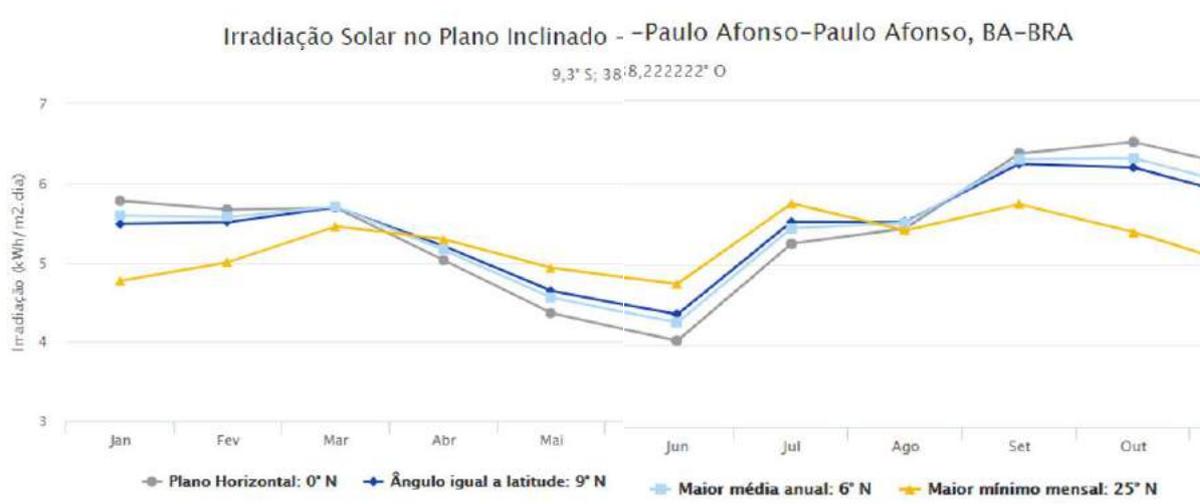
Figura 7 – Localização da realização das medições.



(FONTE: GOOGLE MAPS, 2017)

Os valores da temperatura e irradiância ao longo do ano para qualquer sítio no Brasil são fornecidos pelo Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – (CEPEL), que disponibiliza o programa *Sundata*. A partir deste banco de dados do site CRESESB com a entrada das informações de latitude e longitude, pode-se determinar a angulação adequada para posicionamento da placa observando a Tabela 1, considerando qual a maior média anual de irradiância incidente na cidade de Paulo Afonso mostrada na Figura 8.

Figura 8: Gráfico da irradiância solar por plano inclinado na cidade de Paulo Afonso.



(FONTE: CRESESB, 2017)

Tabela 1: Valores de irradiação média mensal para a localização de realização das medições.

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal (kW/m ² .dia)						
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
Plano Horizontal	0°N	5,78	5,67	5,69	5,03	4,36	4,06	4,31
Ângulo igual a latitude	9°N	5,49	5,51	5,7	5,21	4,64	4,38	4,63
Maior média anual	6°N	5,6	5,57	5,71	5,16	4,56	4,28	4,53
Maior mínimo mensal	25°N	4,77	5,01	5,46	5,29	4,93	4,76	4,99

(FONTE: CRESESB, 2017)

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal (kW/m ² .dia)						
		Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
Plano Horizontal	0°N	5,25	5,44	6,36	6,5	6,17	5,39	2,44
Ângulo igual a latitude	9°N	5,52	5,52	6,23	6,19	5,81	5,4	1,85
Maior média anual	6°N	5,44	5,5	6,29	6,3	5,94	5,41	2,02
Maior mínimo mensal	25°N	5,75	5,41	5,73	5,39	4,96	5,2	0,99

(FONTE: Autoria própria, 2018)

A partir dos dados acima, optou-se pela inclinação de 6° a Norte posição que encontra maior média anual de irradiação. O sistema está montado sobre uma mesa e com um suporte superior para realizar a inclinação desejada.

A aferição das variáveis elétricas foi realizada com o uso de dois multímetros, um de marca Hikari – modelo HM-1100 para aferir os valores de tensão de circuito aberto (V_{oc}) e outro de marca Minipa – modelo ET2042D para aferir os valores de corrente de curto-circuito (I_{sc}), tais variáveis elétricas sem carga, aferido nos terminais de saída da placa fotovoltaica. O mesmo foi realizado com a carga, obtendo os valores de corrente de carga e tensão de carga.

Com o termômetro digital infravermelho com mira à *laser* Minipa – modelo MT-350, aferiu-se a temperatura da placa, realizado em 3 pontos (início, meio e fim) e obtendo a média como resultado. Com os valores adquiridos foram construídas curvas em relação da tensão de curto circuito (V_{oc}) medida *versus* a temperatura da placa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizou-se a água para ser despejada sobre a placa tendo como função trocar calor com a superfície da mesma, a fim de diminuir a temperatura superficial e aumentar a Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}), variável elétrica que possui maior influência da temperatura.

Observando os valores da temperatura da placa (T_{placa}) variando a cada 10°C ; considerou-se 5 temperaturas a partir do 60°C e comparando com os valores de V_{oc} resultantes, mostrados na Tabela 2, nota-se que a menor temperatura de funcionamento da placa, correspondente a 20°C , equivale a um maior valor na V_{oc} . Comparando a temperatura da placa e a temperatura do chão podemos notar que a incidência da radiação solar permaneceu relativamente constante, tendo em vista que a temperatura do chão não sofreu grande variação durante os experimentos.

Tabela 2: Valores aferidos das grandezas elétricas e da temperatura

V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	T_{placa} ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{chão}}$	$T_{\text{água}}$
19,42	3,24	60	58	70
19,58	3,19	50	58	33
20,12	3,17	40	59	33
20,30	3,16	30	52	29
20,44	3,15	20	56	9

(FONTE: Autoria própria, 2018)

Pode-se observar ainda que a temperatura da água despejada sobre a placa modificou proporcionalmente em relação a temperatura que se desejava atingir. Por este motivo que o sistema de arrefecimento conta com um protótipo que atue como uma torre de arrefecimento para induzir, também por convecção, a diminuição da temperatura da água; conseqüentemente da superfície da placa fotovoltaica. Este sistema é visto na Figura 9, utilizou-se o princípio dos radiadores para aumentar a superfície de contador com aletas internas para assim aumentar a troca térmica.

Figura 9: Visão superior das aletas internas do protótipo da torre de resfriamento.

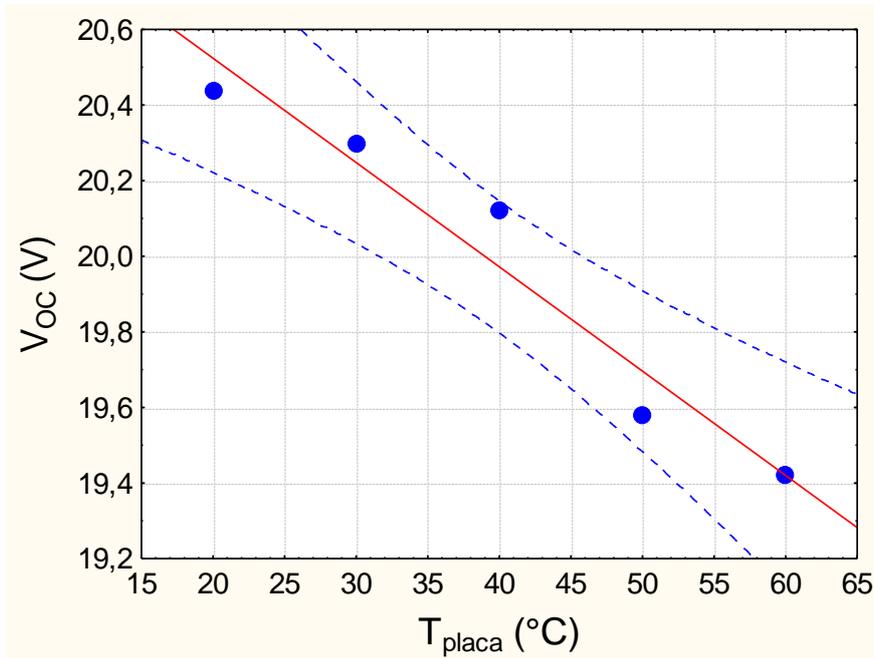


(FONTE: Autoria própria, 2018)

A Figura 10 exhibe uma curva dos pontos experimentais de V_{oc} em função da temperatura da placa. O ajuste obtido por regressão linear apresentou coeficiente de correlação de 94,44% para

um intervalo de confiança de 95%. Os valores de tensão medidos e obtidos via modelo possui um erro padrão de 0,1226 para 5 observações realizadas.

Figura 10: Variação da tensão (V_{oc}) com a temperatura por regressão linear.



(FONTE: Autoria própria, 2018)

O teste qui-quadrado (χ^2) foi utilizado para comparar a dispersão entre a temperatura da placa e a tensão de circuito aberto, avaliando a associação existente entre as duas variáveis, por meio da comparação das proporções entre elas, ou seja, as possíveis divergências entre elas tendo em conta a frequência de ocorrência e observada se as diferenças entre as frequências observadas são muito pequenas, aproximando-se de zero.

No teste de aderência do modelo, obtive na Tabela 3 os resultados, estes indicam que este modelo é indicado para representar os dados experimentais, uma vez que $\chi_c^2 < \chi_r^2$; Estatisticamente os valores não são significativamente diferentes.

Tabela 3: Resultado do teste de aderência Qui-quadrado.

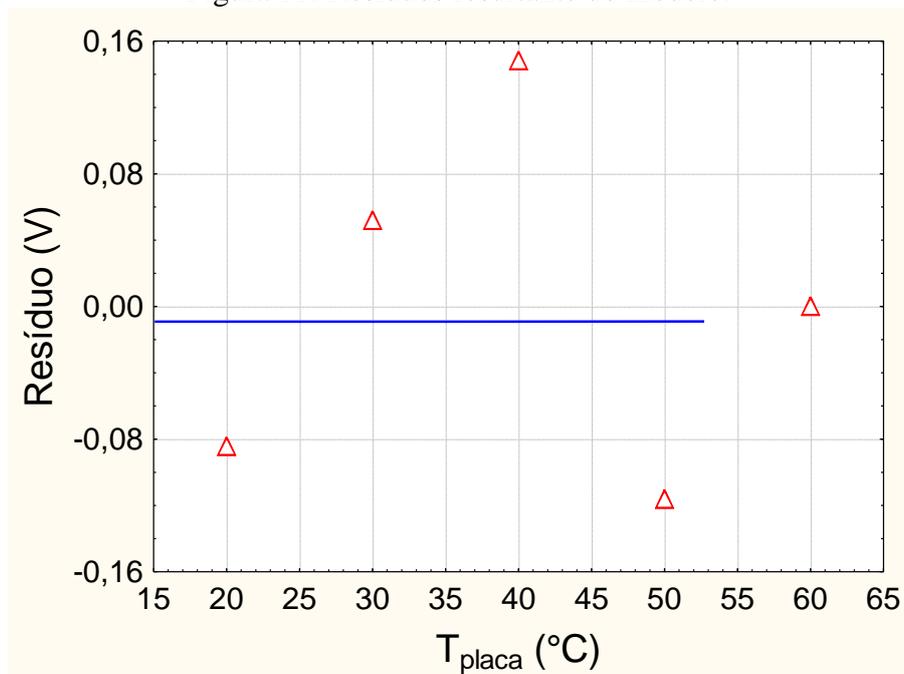
Teste de aderência do teste Qui-quadrado	
$X2_{cal}$	0,0023
$X2_{tab}$	7,8147

(FONTE: Autoria própria, 2018)

Inserindo os valores de temperatura e tensão no *software* Statística do StatSoft® versão do estudante, obtemos um modelo mostrado na Equação 6. Sendo a variável 'x' a entrada para temperatura em grau Celsius e a saída da equação a tensão de circuito aberto em volts.

$$V_{OC} (V) = 21,076 - 0,0276 * x \quad (6)$$

Figura 11: Resíduos resultante do modelo.



(FONTE: Autoria própria, 2018)

Analisando os resíduos, Figura 11, observa-se que os valores de tensão oscilam próximo a zero em relação com a temperatura e que a discrepância não é superior a 0,16V. Isto sugere que o modelo possui boa aderência e que a relação entre as variáveis apresentadas mostra baixa divergência, inferindo que o modelo proposto representado nos dados experimentais obtidos possuem ótima aproximação.

6. CONCLUSÕES

Tendo em vista a influência da temperatura de operação na variável elétrica analisada, tensão de curto circuito (V_{oc}), este trabalho buscou demonstrar experimentalmente que um sistema auxiliar de arrefecimento aplicado a uma placa fotovoltaica pode aumentar a tensão de saída da mesma utilizando um sistema de ciclo fechado para o líquido arrefecedor.

O sistema de arrefecimento se mostrou eficiente no que tange o aumento da tensão de curto circuito. Foi possível verificar o ganho de 1,02V da tensão de saída pela diferença de temperatura

de 40°C. Como a geração por placas fotovoltaicas ainda possui baixa eficiência, os estudos devem avançar para tornar a implantação mais financeiramente viável.

A superfície terrestre possui um grande potencial para a geração fotovoltaica. Os investimentos nesta área se tornam cada dia maiores por ser uma energia limpa e sustentável. Buscar por meio de sistemas que melhorem a eficiência dos painéis fotovoltaicos é uma forma de contribuir a maior disseminação dessa fonte alternativa de geração de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

CONTI, F. **Biometria Qui Quadrado**. Laboratório de Informática – ICB – UFPA última atualização 2009. Disponível em: < <http://www.ufpa.br/dicas/biome/biopdf/bioqui.pdf> >. Acesso em: 24 mar. 2018.

CRESESB, Potencial solar - Programa SunData, 2017. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data> >. Acesso em 24 out. 2017.

MIRANDA G. L., "**Be prepared**", in IEEE Industry Applications Magazine, 2003.

MME - Ministério de Mina e Energia do Brasil, "**Balanco energético nacional**" 2007. Disponível em: < www.mme.gov.br >. Acesso em: 12 fev. 2018.

PINHO, J. T. e GALDINO, M. A; **MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**. CEPTEL – CRESESB, Rio de Janeiro, Março de 2014. Disponível em: < http://www.redemulhersustentabilidade.org.br/Acervo/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf >. Acesso em: 12 jul. 2017.

RANK, N. I; ARAÚJO, A. J. N; BUENO, T. B. A. ANÁLISES DOS FATORES DE PERDAS NOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA EM CURITIBA. 2016. Disponível em: < http://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2015_2_27/2015_2_27_final.pdf >. Acesso em: 31 nov. 2017.

SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnicas MPPT e controle digital**. UFMG. Belo horizonte, Agosto de 2009. Disponível em: < <http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/216M.PDF> >. Acesso em: 25 out. 2017.

SIMIONI, T. **O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do Brasil** – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017. Disponível em: < <http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/simioni.pdf> >. Acesso em: 04 mai. 2017.