

Eixo Temático ET-06-004 - Energia

**AValiação DE GRANDEZAS ELÉTRICAS NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA  
PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA POR SISTEMA DE ARREFECIMENTO  
CONVECTIVO**Mayara Cordeiro França<sup>1</sup>, Luiz Antonio Pimentel Cavalcanti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA, *Campus* Paulo Afonso, Bahia. E-mail: mayarcf@gmail.com.

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA, *Campus* Paulo Afonso, Bahia. E-mail: luiz.cavalcanti@ifba.edu.br.

**RESUMO**

Fontes alternativas de geração de energia elétrica tem sido foco nos últimos anos visando a suprir o consumo energético mundial por vias sustentáveis para diminuir a dependência por combustíveis fósseis. Uma alternativa parte do efeito fotovoltaico, que converte diretamente a energia luminosa do sol (abundante e gratuita) em energia elétrica de forma silenciosa e estática. Este artigo avalia empiricamente os valores de tensão de curto circuito gerada pela placa para diferentes condições de temperatura, controlado através do arrefecimento convectivo da superfície de uma placa fotovoltaica. Tendo em vista que a Geração Distribuída tem se tornado evidente no cenário brasileiro e que a eficiência das placas depende não somente da sua construção química, mas também de fatores externos como a irradiância, a temperatura, o acúmulo de sujeira, sombreamento e inclinação da placa. O fator que mais afeta o Ponto de Potência Máximo ( $P_{MP}$ ) é a temperatura que para a placa utilizada consiste na variação de  $7,2\%/^{\circ}C$ . Isto implica na necessidade de maximizar a eficiência da geração de energia elétrica por placas fotovoltaicas a partir do controle da temperatura. Assim, o sistema de arrefecimento convectivo por película d'água que reutiliza a água para arrefecer uma placa fotovoltaica se mostra como uma ótima solução para elevar a tensão de saída da placa em 1,62V, conseqüentemente elevando  $P_{MP}$ .

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

**INTRODUÇÃO**

Uma maior participação das fontes de energia renováveis na matriz energética tem sido incentivada em nível mundial, e uma série de políticas públicas vêm sendo adotadas por diferentes países a fim de se buscar maior segurança energética. Neste contexto, a energia solar fotovoltaica desempenha, potencialmente, um papel importante na evolução da participação de fontes alternativas na matriz energética mundial, visto sua abundância e ampla disponibilidade na superfície terrestre (NAKABAYASHI, 2014).

Através do efeito fotovoltaico, células solares convertem diretamente a energia do sol em energia elétrica de forma estática, silenciosa, não-poluente e renovável (RÜTHER, 2004). Segundo a Agência Nacional de Energia Elétricas (ANEEL), os maiores índices de radiação são observados na região Nordeste com destaque para o Vale do São Francisco. Este destaque pode ser melhor aproveitado através do controle da temperatura das placas fotovoltaicas.

Segundo Simione (2017), os principais resultados obtidos mostram que o impacto da temperatura de operação das células fotovoltaicas é expressivo na identificação das regiões com maiores potenciais solares reais e que a eficiência elétrica pode ser reduzida em até 15%. Matematicamente, Silva (2016) mostrou que derivando a fórmula do ponto máximo de potência é possível verificar a variação de potência dos módulos fotovoltaicos em relação a um gradiente de temperatura que resulta em -0,46% por grau Celsius.

O presente artigo tem como objetivo avaliar a eficiência de uma placa fotovoltaica a partir dos dados obtidos no projeto de um sistema de arrefecimento em função do controle da temperatura superficial da placa, partindo de um sistema sustentável que utilizou materiais reutilizados.

## OBJETIVO

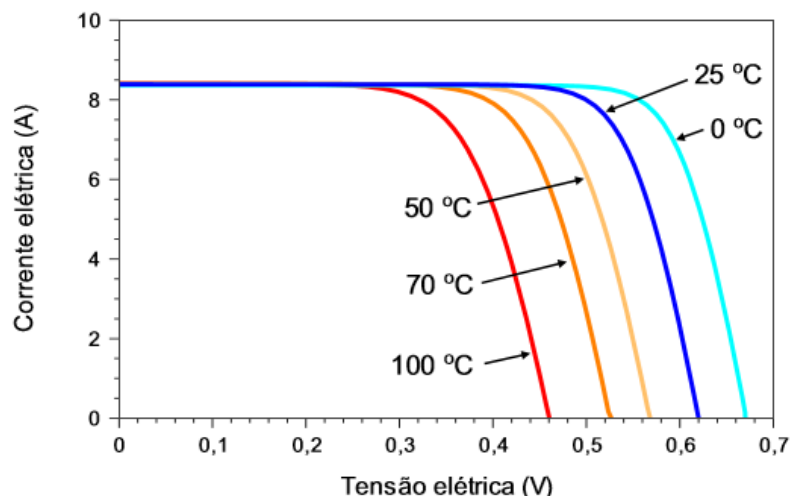
Avaliar a eficiência de uma placa fotovoltaica quando submetida a um sistema de arrefecimento visando o controle de temperatura.

## 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, umidade, 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).

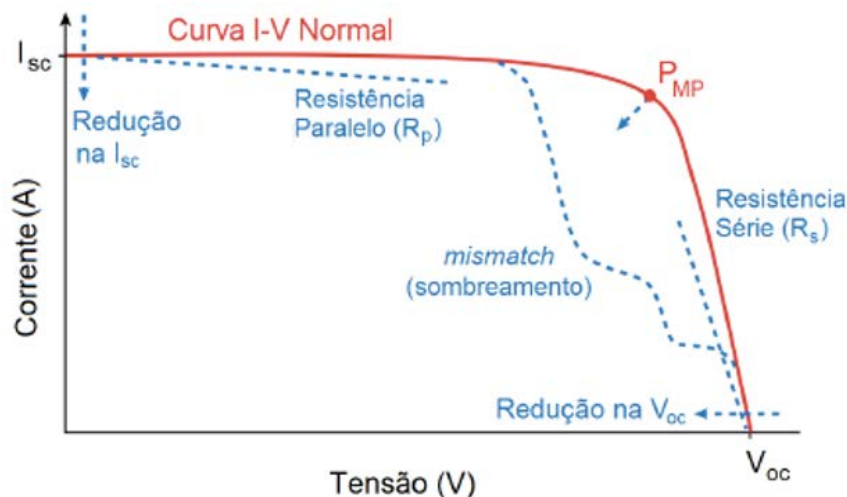
### Os parâmetros de maior influência

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 consequentemente 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; Galdino, 2014).

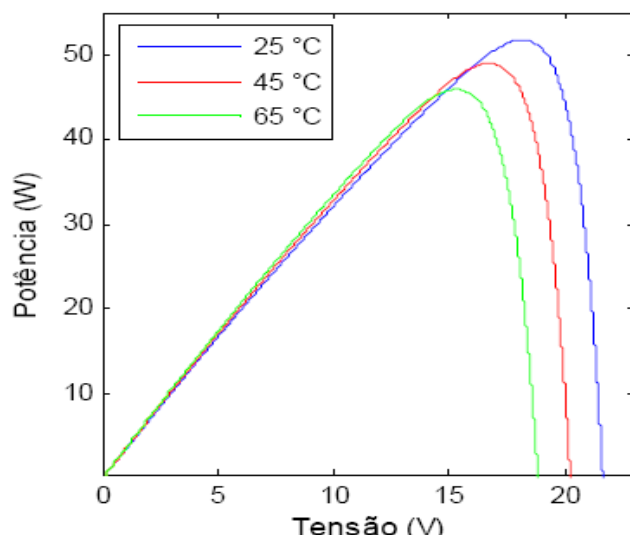
Um modo de se analisar alguns dos fatores de perdas da instalação é observando a curva característica I-V do sistema, apresentado na Figura 2. Esta curva mostra os valores da corrente de saída de um conversor fotovoltaico, em função da sua tensão de saída, em condições preestabelecidas de temperatura e irradiância total. O Ponto de Potência Máxima ( $P_{MP}$ ) ou também denominado como MPP (*Maximum Power Point*) é o ponto da curva na qual o produto da corrente pela tensão é máximo (URBANETZ, 2014 apud RANK 2016).



**Figura 2.** Anomalias da curva I-V de um painel fotovoltaico. (Fonte: Pinho; Galdino, 2014 apud RANK, 2016).

A corrente gerada pela placa fotovoltaica apresenta poucas variações com a alteração da temperatura da célula, porém, com o aumento da temperatura da mesma, a tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico apresenta uma diminuição em seus valores muito mais significativa, em consequência do aumento da temperatura, além de ocorrer um deslocamento para baixo do ponto de máxima potência, este também é deslocado significativamente à esquerda, conforme observado na Figura 3 (SEGUEL, 2009).

O aumento da temperatura faz com que a banda de energia do material semiconductor diminua, resultando em um acréscimo da fotocorrente gerada, de aproximadamente 0,1%. Entretanto, a tensão de circuito aberto, decresce a uma taxa de 0,3%/°C (SEGUEL, 2009).



**Figura 3.** Curva P-V para diferentes temperaturas (Fonte: Seguel, 2009).

#### 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);

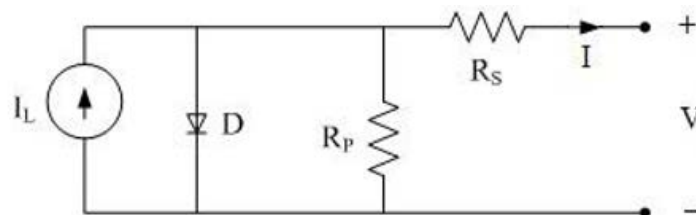
$n$  – Fator de idealidade do diodo, número adimensional geralmente entre 1 e 2, obtido por ajuste de dados experimentais medidos;

$q$  – 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 4.** Circuito equivalente com um diodo para célula fotovoltaica. (Fonte: Pinho; Galdinho, 2014).

Os componentes descritos na Figura 4 que descrevem os seguintes fenômenos, segundo Silva (2016):

$R_s$  – Descreve as perdas ôhmicas do material semicondutor, 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-semicondutor, malhas metálicas, regiões dopadas, etc e uma resistência em paralelo  $R_p$  proveniente de ponto de curto-circuito na junção pn.

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

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:

$$I = n_p \left\{ I_L - I_0 \left[ e^{\frac{q(V + IR_S)}{n_s n_p kT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_p} \right\} \quad (3)$$

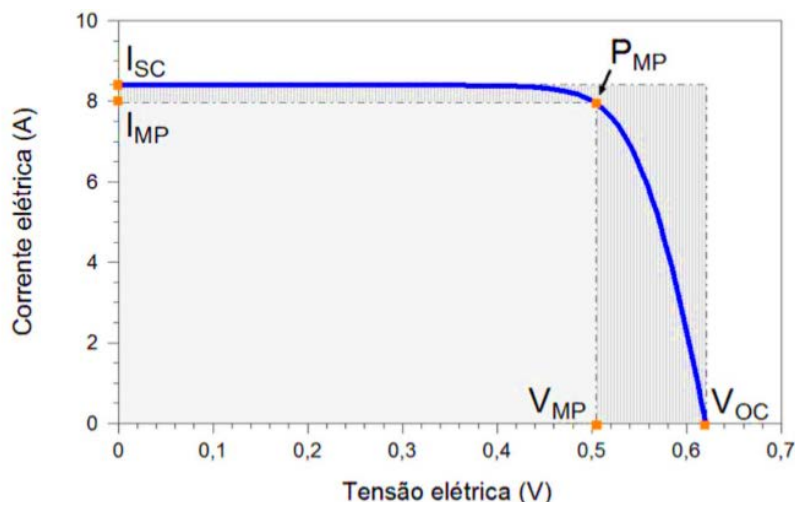
Onde:

$n_p$  – Número de células conectadas em paralelo;

$n_s$  – Número de células conectadas em série.

### Parâmetros elétricos

A partir da Figura 4 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; GALDINHO, 2014).



**Figura 4.** Principais parâmetros elétricos em destaque (Fonte: Pinho; 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* ( $\eta$ ): 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,

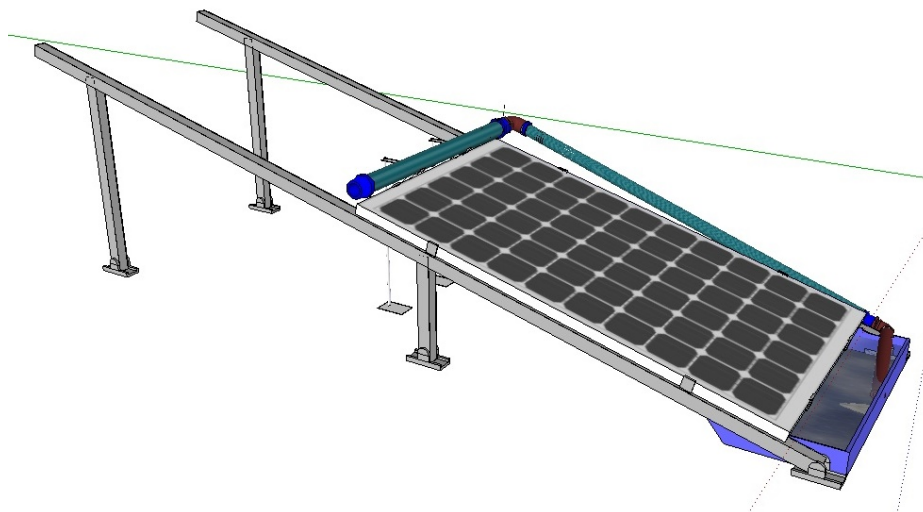
A ( $m^2$ ) é a área da célula;

G ( $W/m^2$ ) é a irradiância solar incidente.

## 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 acoplada a um cano de policloreto de vinila (PVC) de 60cm para despejar a água sobre a superfície da placa (Figura 5).

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 e assim despejar por um cano com furos de 2mm espaçados simetricamente.



**Figura 5.** Sistema de resfriamento por película d'água protótipo montado no SketchUp Pro 2017 (Fonte: Autoria própria).

### 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 6, possui latitude de  $9,38170334^\circ$  S e longitude de  $38.22547495^\circ$  O e elevação de 254 m, segundo dados do GOOGLE MAPS.



**Figura 6.** 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 7.

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

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

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

(Fonte: CRESESB, 2017)

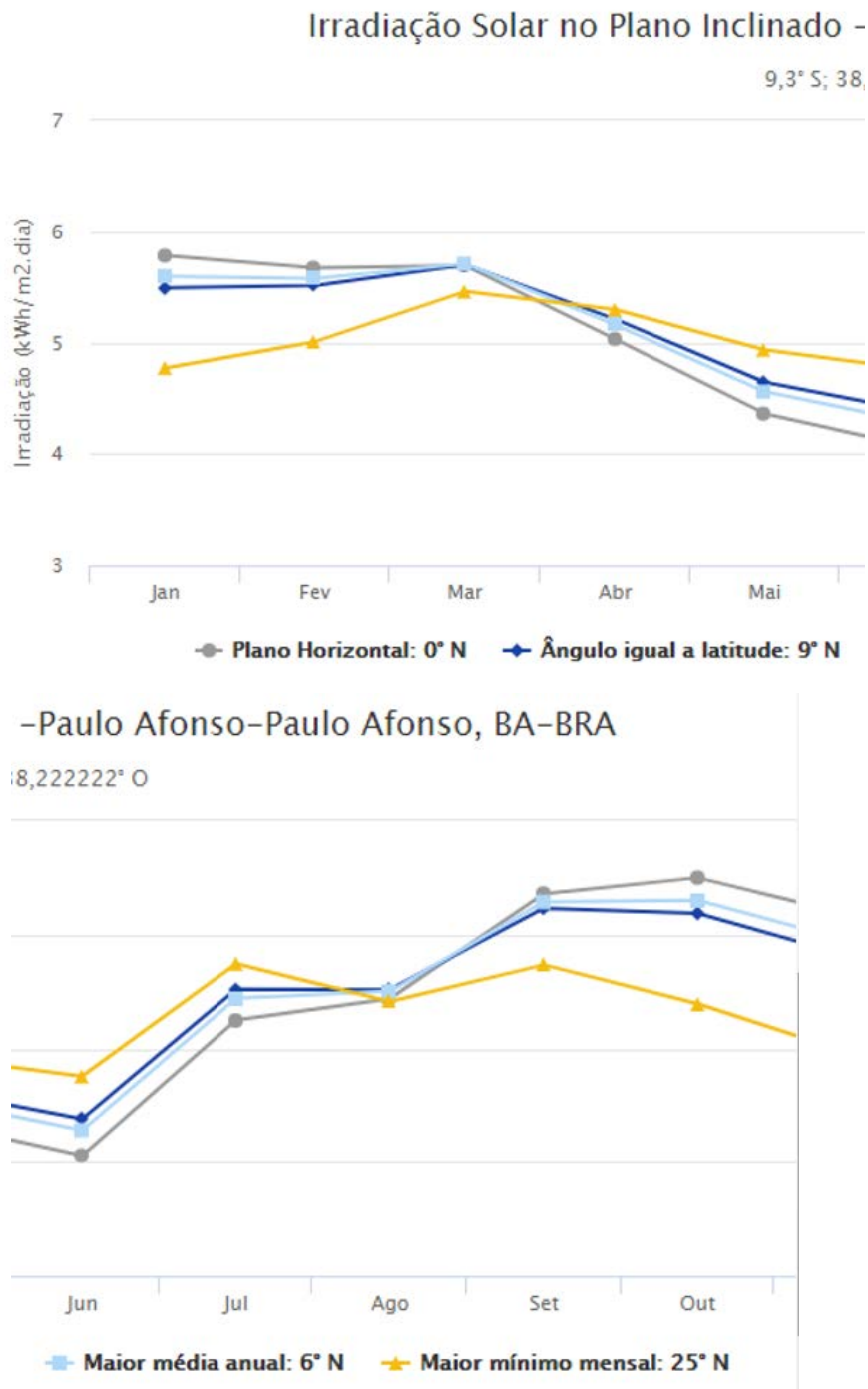


Figura 7. Gráfico da irradiação solar por plano inclinado na cidade de Paulo Afonso (Fonte: CRESESB, 2017)

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 MXT – modelo DT83B para aferir os valores de corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), tais variáveis elétricas sem carga, aferido nos terminais de saída da placa fotovoltaica.



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

## 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 saída, variável elétrica que possui maior variação em função da temperatura.

Observando os valores da temperatura média ( $T_{médio}$ ) e tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), mostrados na Tabela 2.

Comparando a temperatura média 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 variou mais de  $10^{\circ}\text{C}$ .

**Tabela 2.** Valores aferidos das grandezas elétricas e da temperatura.

$V_{oc}$ (V)	$T_{início}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{meio}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{fim}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{médio}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{chão}$
18,98	41,50	45,00	45,00	43,83	60,00
19,13	42,00	41,00	42,00	41,67	65,00
19,40	39,00	40,00	41,00	40,00	67,50
19,75	37,00	37,50	36,00	36,83	62,00
20,00	31,00	35,00	34,00	33,33	61,00
20,30	30,00	27,00	24,00	27,00	58,00
20,50	25,00	25,00	25,00	25,00	59,00
20,60	26,00	17,00	21,00	21,33	58,00

A Figura 8 exibe uma curva de  $V_{oc}$  em função da temperatura média da placa. Observa-se que o ajuste obtido por regressão linear apresentou coeficiente de correlação de 96,71% para um intervalo de confiança de 95%. Já na Figura 9, a regressão não-linear mostrou que tal ajuste apresentou coeficiente de correlação de 98,34% para o intervalo de confiança de 95%, sugerindo que os dados experimentais são melhores ajustados a uma equação polinomial quadrática, concordando com os resultados encontrados por Silva (2016).

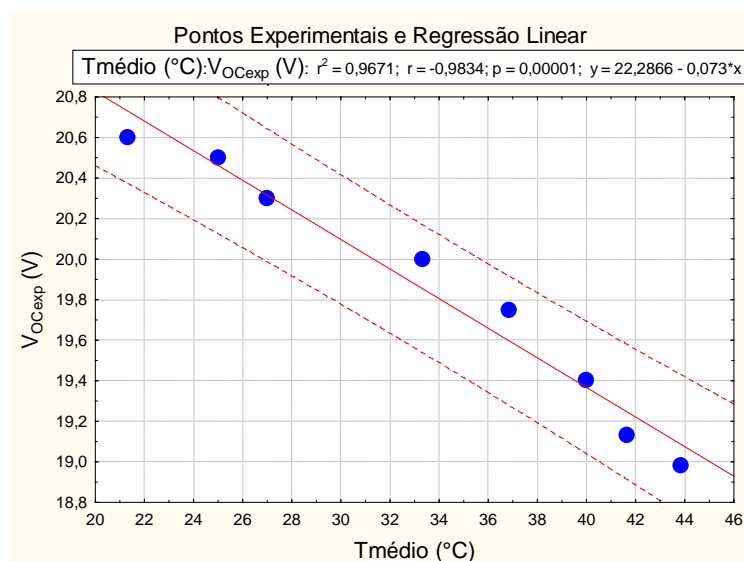
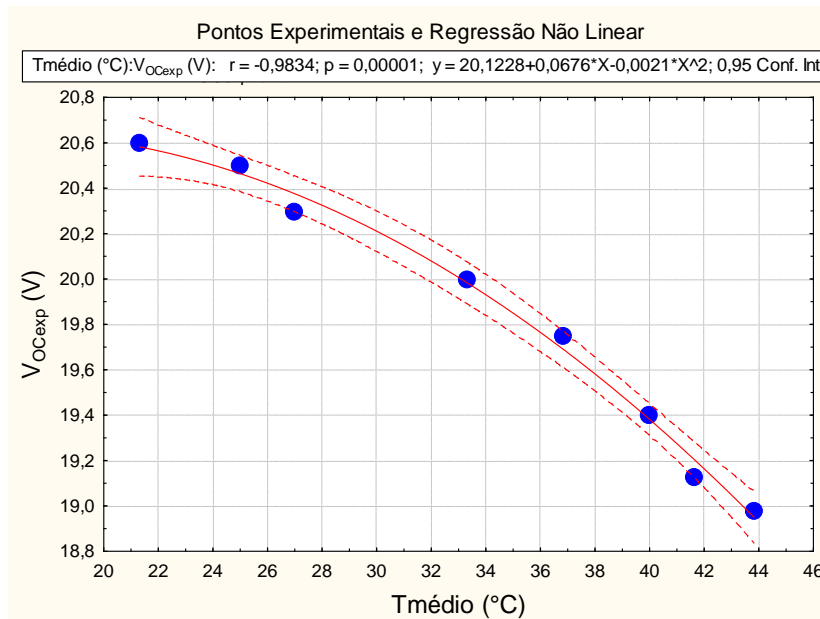


Figura 8. Variação da tensão ( $V_{oc}$ ) com a temperatura por regressão linear (Fonte: Autoria própria, 2017).



**Figura 8.** Variação da tensão ( $V_{oc}$ ) com a temperatura por regressão não linear (Fonte: Autoria própria).

## CONCLUSÃO

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 1,62V da tensão de saída pela diferença de temperatura de 22,5°C. Como a geração por placas fotovoltaicas ainda possui baixa eficiência, os estudos devem avançar para tornar a implantação mais financeiramente viável.

O mundo possui um grande potencial para a geração fotovoltaica. Os investimentos nesta área ser 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

ANEEL. Energia Solar 3. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-energia\\_solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-energia_solar(3).pdf)>. Acesso em: 25 abr. 2017.

NAKABAYASHI, R. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras**. 2014. Dissertação em Ciências- Programa de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014. Disponível em: <[http://www.iee.usp.br/lsf/siteses/Dissertacao\\_Renno\\_vfinal.pdf](http://www.iee.usp.br/lsf/siteses/Dissertacao_Renno_vfinal.pdf)>. Acesso em: 02 maio 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014. Disponível em: <[http://www.redemulhersustentabilidade.org.br/Acervo/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.redemulhersustentabilidade.org.br/Acervo/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)>. Acesso em: 12 abr. 2017.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004. Disponível em: <<http://fotovoltaica.ufsc.br/sistemas/livros/livro-edificios-solares-fotovoltaicos.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 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 abr. 2017.

SILVA, G. J; SILVA, W. W. A. G; REIS, G. L; e RODRIGUES, W. A. **Impacto da temperatura na geração solar.** SBSE - 2016.

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/ppe/production/tesis/simioni.pdf>>. Acesso em: 04 mai. 2017.

RANK, N. I; ARAÚJO, A. J. N; BUENO, T. B. A. **Análises dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos conectados á 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](http://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2015_2_27/2015_2_27_final.pdf)>. Acesso em: 31 out. 2017.