

Impacto da Temperatura na Geração Solar

Gustavo Jorge Silva
Universidade Federal de
Itajubá – Campus Itabira
Itabira, Brasil
gustavo.jorge09@gmail.com

Waner Wodson A. G.
Silva
Universidade Federal de
Itajubá – Campus Itabira
Itabira, Brasil
waner@unifei.edu.br

Geovane L. dos Reis
Universidade Federal de
Itajubá – Campus Itabira
Itabira, Brasil
geovanereis@unifei.edu.br

Welbert Alves Rodrigues
Departamento de
Engenharia Elétrica -
ICEA/UFOP
welbert@deelt.ufop.br

Resumo— A matriz energética mundial vem se modificando. O destaque é maior para as gerações limpas, com baixas emissões de carbono, sendo necessário cada vez mais a implantação deste tipo de energia. A energia fotovoltaica é considerada uma forma de geração limpa, visto que a conversão de energia não emite poluentes ao meio ambiente. A grande limitação em relação ao seu uso se associa ao elevado custo, sendo essencial o desenvolvimento de métodos que o reduzam, afim de o tornar um investimento atraente. O trabalho tem como objetivo avaliar os fatores que influenciam na eficiência da célula fotovoltaica, assim como aumentar a sua eficiência através do resfriamento.

Palavras-chave— Célula Fotovoltaica, Eficiência, Fator de Forma, Temperatura.

I. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica utilizando fontes renováveis tem aumentado vertiginosamente. Por conta disso, a produção de energia elétrica, utilizando células fotovoltaicas tem ganhado destaque. No ano de 2014, estima-se que o potencial de geração fotovoltaico instalado mundialmente foi de 40GWp [1]. Existe uma grande preocupação mundial em reduzir as emissões de CO₂, uma vez que este é um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa, e uma das maneiras viáveis para esta redução, é a elevação do percentual de participação da geração fotovoltaica na matriz energética mundial.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no Brasil atualmente, apenas 0,02% da matriz energética é dependente da geração fotovoltaica [2]. Isso se justifica principalmente devido ao seu alto custo de implantação. Nesse sentido, busca-se uma maneira de tornar mais rápida a redução dos custos, afim de popularizar a utilização de geração distribuída a partir da célula fotovoltaica [3].

II. A PLACA FOTOVOLTAICA

Atualmente as principais células fotovoltaicas fabricadas são de silício cristalino (c-Si) que são divididas em duas categorias: monocristalino (M-Si) e o poli cristalino (p-Si), silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), telureto de cádmio (CdTe) e índio (CIGS). A tecnologia mais utilizada e que, portanto, apresenta maior escala de produção a nível comercial é a de silício cristalino (c-Si), pois apresenta maior eficiência e relativo baixo custo de produção quando comparada as outras.

Uma das maneiras de se modelar a célula fotovoltaica é parametrizar a célula através de resistores e diodos. Esse método é chamado de “Single Diode Model” (SDM). Existe também o modelo chamado de “Ideal Single Diode Model”,

(ISDM), onde é omitido a resistência série e shunt da placa. Esses dois modelos são exemplificados nas Fig. 1.a e 1.b.

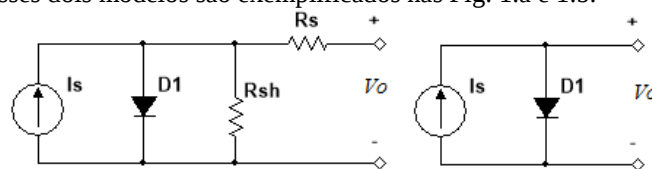


Fig.1: Modelo da célula fotovoltaica. a) SDM b) ISDM.

Os componentes do modelo SDM mostrado na Fig. 1 representam os seguintes fenômenos [2]:

- R_s : Descreve as perdas ôhmicas do material semiconductor, nos contatos metálicos e no contato do metal com o semiconductor;
- R_{sh} : Descreve as perdas que surgem principalmente através das perturbações elétricas causada por impurezas e defeitos na estrutura cristalina;
- I_s : Representa a corrente gerada a uma determinada insolação;
- D_1 : A junção P-N;
- V_0 : A tensão nos terminais de saída de uma célula.

A partir das equações características do diodo tem-se a equação (1), que é a corrente fornecida por uma célula solar ao circuito externo (I_{sc}).

$$I = I_s - I_o \cdot \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{AkT}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Onde:

I_s : Corrente de carga;

I_o : Corrente de saturação reversa do diodo;

q : Carga do elétron $-1,60 \cdot 10^{-19} \text{C}$;

k : Constante de Boltzmann $-1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$;

T : Temperatura absoluta K;

A : Constante de idealidade do diodo - número adimensional geralmente entre 1 e 2;

V : Tensão nos terminais de saída da célula.

O modelo matemático descrito na equação 1 é valido somente para placas fotovoltaicas isoladas. Porém, isoladamente essas placas possuem produção de tensão e corrente limitadas. Assim, é comum a aplicação de arranjos de placas para a elevação da corrente e/ou tensão, e nesses casos, deve-se considerar a quantidade de células em paralelo e série (2):

$$I = N_p \left(I_s - I_o \left(e^{\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right)}{A k T}} - 1 \right) - \frac{\left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right)}{R_p} \right) \quad (2)$$

Onde:

N_s : Número de células em série;
 N_p : Número de células em paralelo.

A corrente de curto circuito da placa fotovoltaica, para uma dada temperatura, é relacionada por (3):

$$I_{SC}(T) = (I_{SC} + \alpha \cdot \Delta T) \cdot \frac{S}{1000} \quad (3)$$

Onde:

α : Coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito;

S : Radiação incidente em W/m^2 ;

I_{SC} : Corrente de curto-circuito da célula na *Standard Test Conditions (STC)*, irradiação igual a $1000 W/m^2$, temperatura do módulo em $25^\circ C$ e massa absoluta de ar equivalente a 1,5;

ΔT : Temperatura de operação ($^\circ C$) - $25^\circ C$.

A análise da eficiência da placa é realizada pelo Fator de Forma (FF). O FF é a grandeza que expressa o quanto a curva característica do painel se aproxima de um retângulo no diagrama I-V. Quanto melhor a qualidade das células no módulo, mais retangular será a curva I-V como mostra a Fig. 2. Assumindo que a célula fotovoltaica se comporta como um diodo ideal, é possível calcular o FF da placa com (4):

$$FF = \frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \cdot \frac{I_{MPP}}{I_{SC}} \quad (4)$$

Onde:

I_{MPP} : Ponto de máxima corrente;

V_{MPP} : Ponto de máxima tensão;

I_{SC} : Corrente de curto circuito;

V_{OC} : Tensão de circuito aberto.

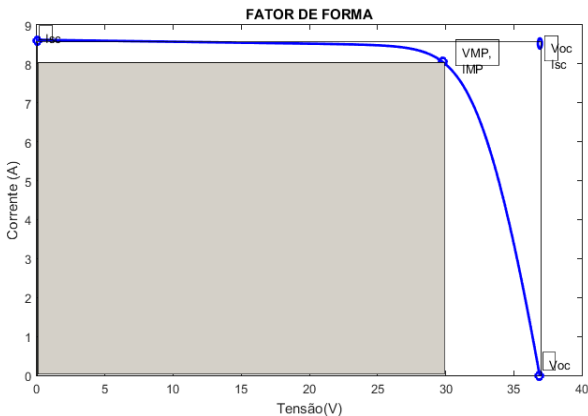


Fig. 2: Fator de forma de uma célula fotovoltaica.

Para o cálculo do rendimento, é utilizada a equação mostrada em (5):

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_{IN}} = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{P_{IN}} \quad (5)$$

Onde:

P_{IN} : Irradiação solar.

A variação da temperatura não causa alterações drásticas na corrente de curto circuito, porém a tensão de operação das células sofre uma grande variação.

Quando a temperatura é elevada, mantendo a irradiação constante, tem-se uma ligeira elevação dos valores de I_{SC} e de I_{MPP} , porém os valores de V_{PMAX} e V_{OC} decaem, reduzindo em cerca de $0,5\% / ^\circ C$ a eficiência da placa [4][5].

III. FATORES QUE INFLUENCIAM NO RENDIMENTO DA CÉLULA SOLAR

As placas fotovoltaicas possuem um rendimento máximo próximo dos $18,5\%$ [6]. A resistência R_s está diretamente ligada a redução da corrente de curto circuito, que afetará o fator de forma da célula, reduzindo, então, seu rendimento. Já a resistência R_{sh} afeta o FF, reduzindo a tensão de circuito aberto (V_{oc}), sem afetar a corrente de curto circuito.

A irradiação solar está diretamente atrelada a corrente elétrica do painel, quanto maior é a irradiação, maior é a corrente drenada pelo conjunto fotovoltaico, como apresenta a Fig. 3. Outro fator de eficiência do painel é a necessidade de uma excitação mínima (irradiação mínima) para gerar energia, o que faz com que em dias de baixa irradiação, a geração elétrica seja muita abaixo da potência nominal.

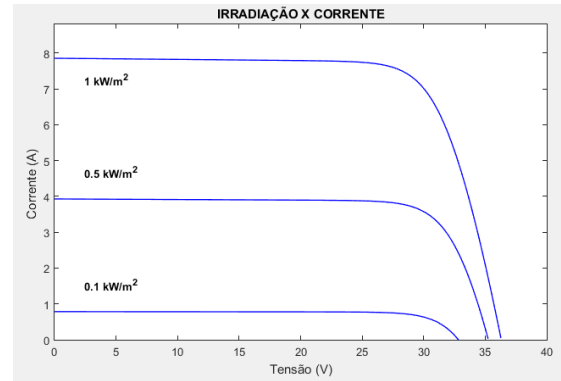


Fig. 3: Influência da irradiação no painel fotovoltaico.

Outro fator é a influência da temperatura. Quando a temperatura é elevada, tem-se consequentemente a elevação da movimentação de elétrons da banda de valência para a banda de condução do material, mais elétrons estão sendo excitados do estado fundamental para um nível de energia maior, levando, então, a redução do *gap* de energia necessária para a condução. Isto provoca a redução da tensão de operação do conjunto de painéis, reduzindo, desta forma, a potência total gerada, como apresentado na Fig. 3.

Para se realizar uma estimativa do quanto a temperatura altera a tensão de operação da placa, deve-se levar em consideração os seguintes parâmetros.

- Parâmetro β : Representa a variação da tensão de circuito aberto com a temperatura. É obtido através do FF da placa, mas no geral é fornecido pelo fabricante da placa fotovoltaica, representado pela equação (6).

$$\beta = \frac{\Delta V_{oc}}{\Delta T} \left[-\frac{V}{T} \right] \quad (6)$$

- Coeficiente α : Relaciona a variação da corrente de curto-circuito com a temperatura. É obtido através do FF da placa, e também é fornecido pelo fabricante, mostrado na equação (6).

$$\alpha = \frac{I_{sc}}{\Delta T} \left[\frac{A}{T} \right] \quad (7)$$

- Coeficiente γ : Representa a variação da máxima potência de pico com a temperatura. Esse coeficiente assume valores de $\pm 0,5 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ para painéis feitos de c-Si.

Utilizando os coeficientes, pode-se calcular a V_{oc} e I_{sc} com as equações (8) e (9):

$$V_{oc}(T) = V_{ocp} \cdot (1 + \beta \cdot (T - 25)) \quad (8)$$

$$I_{sc} = I_{scp} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (9)$$

Utilizando (8) e (9), pode-se descrever o ponto de máxima potência, utilizando (10):

$$\begin{aligned} P_{MP}(T) &= V_{MPP} \cdot (1 + \beta_{VMP} \cdot \Delta T) \cdot I_{MPP} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \\ &= V_{MPP} \cdot I_{MPP} \cdot (1 + (\alpha + \beta_{VMP}) \cdot \Delta T) \end{aligned} \quad (10)$$

A Fig. 4.a e 4.b, demonstram a influência da temperatura na V_{oc} , I_{sc} , onde 4.a mostra que a variação da tensão pela temperatura é inversamente proporcional e 4.b, a relação da corrente com a temperatura, diretamente proporcional.

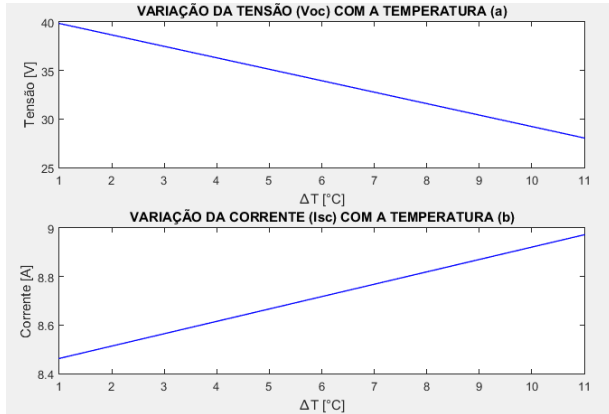


Fig. 4: Variação de V_{oc} e I_{sc} com a temperatura. Nota-se que a tensão sofre uma grande variação com a temperatura (a), enquanto I_{sc} pouco se altera (b).

Derivando (10) em relação a ΔT , é possível verificar a variação de potência em relação a variação de temperatura (11) [7].

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{MP}}{\partial \Delta T} &= V_{MPP} \cdot I_{MPP} \cdot \alpha + V_{MPP} \cdot I_{MPP} \cdot \beta_{VMP} = \\ &= -0,46 \left[\frac{\%}{^{\circ}\text{C}} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

Isso mostra que a cada grau Celsius, a potência de saída da placa varia -0,46%. Em (11) foi utilizado valores de α , β , tensões e correntes da placa Kyocera KD240GX-LFB. Caso seja desconhecido o valor de α e β é possível utilizar o valor de $\alpha = 0,004$ e $\beta = -0,0023$ para células fabricadas de c-Si [7].

O fator de forma sofre influência devido a temperatura. Isto pode ser verificado na Fig.5.

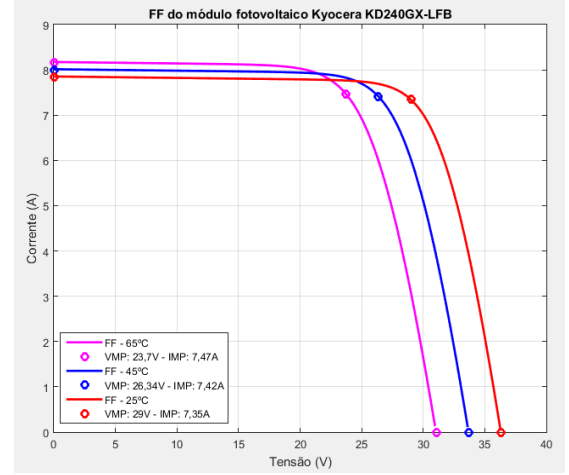


Fig. 5: Fator de forma em diferentes temperaturas e irradiação fixa no módulo Kyocera 240GX-LFB.

Utilizando (4) e (7), é calculado o fator de forma e o rendimento para as três temperaturas com potência de entrada equivalente a 1000 W/m^2 , como verificado na Tabela I.

Tabela I: Fator de forma e rendimento calculados, com a variação da temperatura de operação.

Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]:	25	45	65
Fator de forma:	0,67	0,61	0,55
Rendimento [%]:	21,2	19,34	17,43

Como pode ser observado, quanto maior a temperatura de operação, menor é o fator de forma e também o rendimento da placa. Deve-se atentar que o rendimento encontrado é superior ao informado pelo fabricante, porém este é um cálculo obtido através de uma simulação, não levando em consideração influencias externas. É notável que quanto menor a temperatura de operação, mais próximo a 1 é o fator de forma, portanto, melhor é o rendimento.

Segundo o Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, o máximo de eficiência alcançada em laboratório de uma célula fotovoltaica construída de poli-Si é de 20,8%. Já uma célula comercial possui sua eficiência em 18,5% [6]. Esses valores são para as células instaladas em ambientes como telhados e grandes usinas fotovoltaicas, sem nenhum tipo de resfriamento ou controle da potência gerada. Uma forma de aumentar a eficiência pode ser através do seu resfriamento. Com um conjunto fotovoltaico operando em temperaturas reduzidas, é possível extrair uma potência maior do que aquela sem resfriamento, como visto através da equação (11).

IV. ESTUDO DE CASO

Para efeito comparativo, tem-se o seguinte exemplo:

Um sistema fotovoltaico comercializado para atender uma residência é composto por um conjunto com 6 painéis solares, com potência de pico de 1.5kWp, com 17% de eficiência, instalados e conectados à rede, seu custo é de aproximadamente R\$ 15.500,00. Em Itabira, a média anual de horas com sol em um dia, é de 6 horas [8]. Considerando que o inversor de frequência possui uma eficiência de 97% de conversão, em um mês tem-se que esse conjunto fotovoltaico gerou em torno de 261,9 kWh. Em um ano, 3.142MWh e em sua vida útil, que é estimada de 20 anos, o conjunto gerou em torno de 62.856MWh. Desconsiderando a depreciação do sistema e tomando como referência o kWh a R\$ 0,80, que é um preço comercial, tem-se que o tempo de *payback* desse sistema é de 74 meses.

Esse mesmo conjunto, nas mesmas condições com o incremento de um sistema de refrigeração com sua temperatura de operação reduzida em 20°C, utilizando o fator γ que é de - 0,5 % / °C, a eficiência da placa se elevaria em 10%. Nesse sistema, em um mês serão gerados 288.09kWh. Em um ano 3.456MWh e em sua vida útil 69.1416 MWh. Realizando a mesma comparação anterior de *payback*, esse sistema se pagará em 68 meses. Considerando o tempo de vida útil, o sistema refrigerado geraria 10% mais energia e representaria um ganho financeiro de até R\$ 5,000 reais. A Tabela II apresenta a comparação entre o sistema normal e com resfriamento.

Tabela II – Comparação entre um sistema de geração fotovoltaico sem e com refrigeração.

	Sem resfriamento	Com resfriamento
Energia mensal	261,9 kWh	288.09 kWh
Energia anual	3.142 MWh	3.456 MWh
Energia em 20 anos	62.856 MWh	69.1416 MWh
<i>Payback</i>	74 meses	68 meses

No Brasil, um dos maiores empreendimentos fotovoltaico, está localizado na Bahia, é o Estádio Roberto Santos, mais conhecido como Estádio de Pituáçu. Esse estádio é de pequeno porte com capacidade de aproximadamente 32.000 espectadores e possui geração instalada de aproximadamente 405 kW, a Fig. 7 apresenta uma visão panorâmica desse estádio. Segundo a Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA), os painéis foram instalados na cobertura e estacionamento e geram atualmente cerca de 633MWh anuais. A maior parte da energia, cerca de 52,5 MWh/mês, é consumida no próprio estádio, o restante aproximadamente 22,8MWh/mês, é utilizada para abater na conta de energia elétrica de outros órgãos públicos, como a Secretaria Estadual do Trabalho, Emprego, Renda e Esporte (SETRE). A COELBA estima que o estado irá deixar de gastar cerca de R\$ 120.000,00 anualmente por conta desse sistema.

Com o resfriamento dos painéis em 20°C, é possível elevar em 63,3MWh/ano a geração de energia elétrica no estádio Pituáçu. Energia que poderá ser destinada para suprir outros

órgãos públicos, reduzindo os gastos públicos com energia e economizando um total de R\$ 132.000,00 anuais [9].

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de energia elétrica residencial na região nordeste, no mês de agosto de 2015, foi de aproximadamente 2GWh. Com a elevação de 10% na eficiência dos painéis de Pituáçu, seria possível gerar 3,16% o consumo total de energia elétrica da região nordeste, somente em uma única usina fotovoltaica, revelando o quão grande é o impacto do resfriamento na geração [10].

Em uma usina fotovoltaica de potência instalada de 3kWp, situada em Belo Horizonte/MG foi monitorado o perfil de geração diário. Como pode ser observado na Fig. 6 em um dia ensolarado não foi alcançado a máxima geração instalada. Sua geração máxima foi próxima a 2500W.

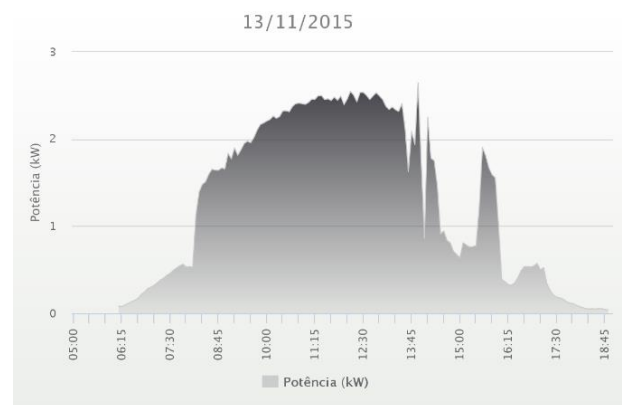


Fig. 6: Curva de geração de um dia ensolarado.

Já na Fig.7, tem-se a geração em um dia ensolarado, porem chuvoso. Como pode ser observado, em certos instantes no dia, a potência gerada foi equivalente a potência instalada - 3000W. Isto se deve a redução da temperatura do painel fotovoltaico. Um conjunto fotovoltaico opera em uma temperatura média de 60°C, porém ele é especificado para uma temperatura de operação em 25°C.

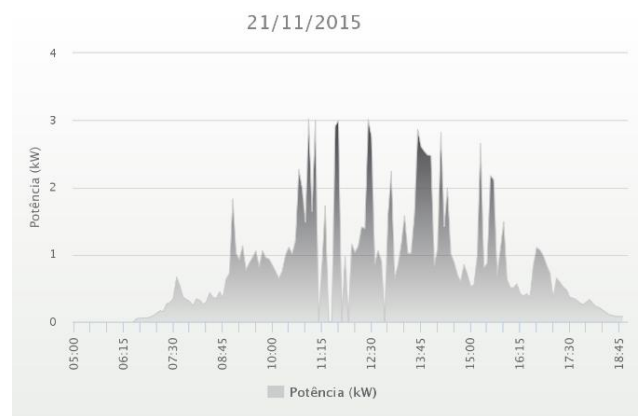


Fig. 7: Curva de geração de um dia chuvoso e ensolarado.

Como dito anteriormente, a cada grau de elevação da temperatura, é reduzido em média 0,5% sua eficiência. Para o conjunto monitorado de 3kWp, operando em *STC* (25°C –

1000W/m²), a potência fornecida máxima é de 3000W. Este mesmo conjunto operando em 60°C, ou seja uma elevação de 35°C, tem como consequência a redução de 17,5% de eficiência, e portanto a potência total gerada é de somente 2475W, como pode ser verificado na Fig. 7. Em um dia ensolarado e chuvoso, Fig. 8, o conjunto atingiu a potência máxima de geração. Isto é devido a redução da temperatura de operação dos conjuntos. Em dias ensolarados, como no verão, existe uma perda de geração de aproximadamente 17% devido a temperatura de operação dos conjuntos fotovoltaicos, quanto menor a temperatura de operação, maior é a potência extraída dos conjuntos. Este é o motivo de poucas vezes a usina fotovoltaica gerar a potência máxima, pois quanto maior a irradiação no painel, maior é a temperatura de operação e menor sua eficiência.

V. EXPERIMENTO: REDUÇÃO DA TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DO PAINEL UTILIZANDO ÁGUA CORRENTE

Para a redução de temperatura do painel fotovoltaico, foi desenvolvido um sistema de refrigeração com água corrente com objetivo de verificar experimentalmente o resultado teórico do ganho de potência. O mecanismo de refrigeração consistiu de um cano de 1/2” de 8 metros, com furos igualmente espaçados e alinhados de diâmetro de 2mm, com conexões para mangueira de água em suas duas extremidades. O sistema foi fixado juntamente a um conjunto de painéis fotovoltaicos na borda superior dos mesmos, como mostra a Fig. 8. A Fig. 9 apresenta o local onde foram instalados os arranjos fotovoltaicos para o experimento, na Fig. 10, apresenta o sistema resfriando o painel através da água que flui pelos orifícios feito no cano e percorrendo a superfície do módulo.

O conjunto de painéis utilizado nos dois arranjos fotovoltaicos foi o Kyocera KD240GX-LFB. Cada arranjo é composto de 6 módulos de 240W. Um arranjo foi resfriado e o outro se manteve suas condições normais.



Fig. 8: Conjunto de painéis fotovoltaicos com o sistema de refrigeração instalado.

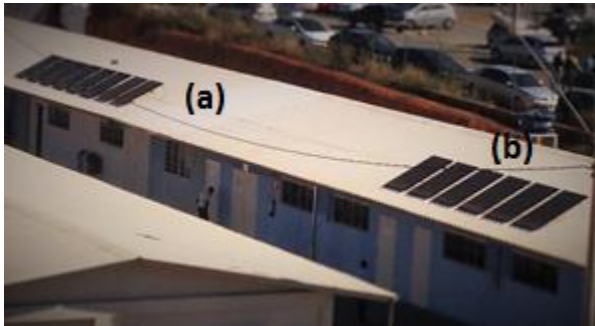


Fig. 9: Módulos fotovoltaicos (a) arranjo resfriado, (b) arranjo não resfriado.

Foram utilizados dois inversores PHB 1500SS fazendo a conexão do sistema à rede elétrica da Instituição. Um termopar NI USB-TC01 foi instalado na posição traseira de um módulo de cada arranjo. A potência gerada foi medida com o analisador de qualidade Fluke 435. A coleta de dados foi feita em intervalos regulares de 10s durante 90 minutos. Nesse intervalo foram registrados, os respectivos valores, de potência de geração e temperatura dos painéis.

Com os painéis limpos e a instrumentação devidamente instalada, foi escolhido um dia com uma grande irradiação solar, com temperatura de 30 °C, umidade de 50%, céu limpo. O teste foi realizado visando o período de maior irradiação e temperatura, que é próximo das 12 horas.



Fig. 10: Sistema de refrigeração instalado e funcionando em um conjunto de painéis fotovoltaicos.

VI. RESULTADOS

O sistema de refrigeração se mostrou eficiente. Utilizando o Y fornecido pelo fabricante, que é de -0,46 %/°C, foi possível verificar que o conjunto fotovoltaico apresentou um ganho de eficiência de 10,9%, com uma diferença de temperatura de 23,7°C, que era o esperado. Abaixo, a Tabela III apresenta algumas diferenças de temperatura, potência e ganho de eficiência.

Tabela III – Verificação de resultados.

	Conjunto não resfriado	Conjunto resfriado	Conjunto não resfriado	Conjunto resfriado	Conjunto não resfriado	Conjunto resfriado
Potência [W]	1046	1161	864	892	916	963
Temperatura [°C]	51,5	27,8	48,2	40,8	49,2	36,9
Ganho de eficiência Prático [%]	10,9		3,24		5,13	
Ganho de eficiência Teórico [%]	10,9		3,4		5,65	

Na tabela acima, é possível verificar três pontos de operação dos conjuntos fotovoltaicos. É possível observar que quanto menor a temperatura de operação, maior é a potência de saída se comparado com o conjunto não resfriado.

Como pode ser visualizado na Fig. 11, é possível verificar que submetidos às mesmas condições climáticas, o painel que operou a uma temperatura inferior, ofereceu uma potência de saída maior. Quando submetidos à mesma temperatura, as potências de saída se igualaram. Esta diferença de potência é devida justamente pelo aumento da eficiência do conjunto fotovoltaico.

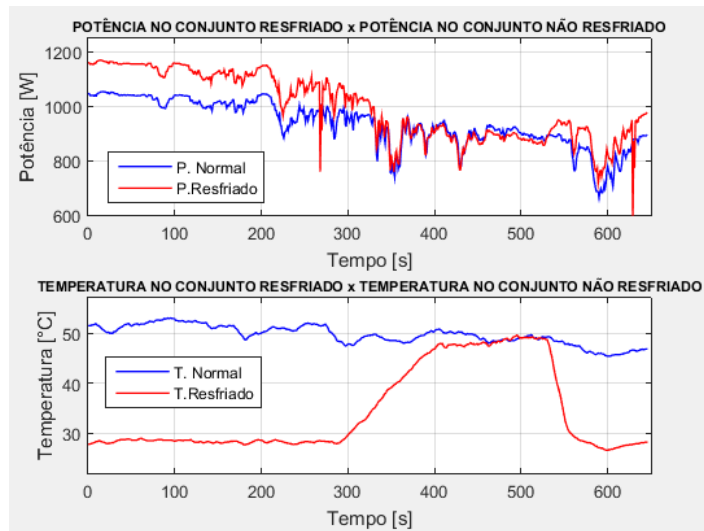


Fig. 11: Variação da potência e variação da temperatura.

VII. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os aspectos mais relevantes sobre a eficiência dos painéis fotovoltaicos. No geral, os painéis fotovoltaicos apresentam uma eficiência muito baixa e um custo de implantação muito alto. É necessário avançar nos estudos sobre este tipo de geração e resfriamento, já que os resultados foram positivos.

Segundo a EPE, o Brasil possui um potencial fotovoltaico residencial de 230% o seu consumo atual, e somente 0,02% da matriz energética brasileira é fotovoltaica [3]. Segundo a International Energy Agency [1] de 2015 a 2040 é previsto que o mundo invista cerca de 200 bilhões de dólares anualmente neste tipo de geração. Todo esse investimento é buscando uma redução da poluição mundial. O que move o mundo é a energia, e é necessário ter uma matriz energética limpa para a sustentabilidade do mesmo. Elevar a eficiência das células fotovoltaica também é um meio de buscar a sustentabilidade do meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer o professor orientador MSc. Waner Wodson pelo empenho, profissionalismo e comprometimento em me auxiliar a desenvolver este trabalho. Também fica o agradecimento a Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira, pela disponibilização da estrutura dos laboratórios e aos técnicos e responsáveis pelos mesmos. Agradecer também a PHB pelo fornecimento dos inversores para sistema solar.

Aos meus pais e familiares, muito obrigado pelo apoio e conselhos durante o tempo de desenvolvimento do trabalho e graduação, pois foram e são parte fundamental da minha formação pessoal e profissional.

REFERÊNCIAS

- [1]. International Energy Agency. World Energy Outlook Special Report. Energy and Climate Change 2015.
- [2]. Banco de Informações de Geração. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).
- [3]. Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos (2014). Empresa de Pesquisa Energética.
- [4]. SEGUEL, J. “Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital”. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
- [5]. SPERTINO, F. Structure and Operation of the Solar Cell. Lecture notes. Politecnico di Torino.
- [6]. Fraunhofer, Photovoltaics Report. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>. Acesso em 09/10/2015.
- [7]. Grupo de Trabalho de Energia Solar, Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL.
- [8]. Energia Solar – Radiação Solar. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_2.htm. Acesso em 09/10/2015.
- [9]. Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia. Disponível em: <http://www.coelba.com.br/Noticias/Pages/Coelba-Inaugura-Centro-de-Visita%20-%20Sobre-Energia-Solar-no-Estado-de-Pitua.aspx>. Acesso em 09/10/2015.
- [10]. Consumo mensal de energia elétrica por classe (regiões e subsistemas) – 2004-2015. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumomensaldeenergiael%C3%A9trica%20por%20classe\(regi%C3%B5es%20e%20subsistemas\)%E2%80%932011-2012.aspx](http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumomensaldeenergiael%C3%A9trica%20por%20classe(regi%C3%B5es%20e%20subsistemas)%E2%80%932011-2012.aspx). Acesso em: 09/10/2015.