

Análise do Desempenho de Módulos Fotovoltaicos Relacionando sua Temperatura e Variações da Estrutura de Fixação na Região Centro-Oeste de Minas Gerais

Wanderson Israel Ferreira.* Lucas Almeida de Jesus.
Cláudio Henrique Gomes dos Santos, Dr.*****

*Pós Graduando Lato Sensu em Sistemas e Dispositivos Mecatrônicos
CEFET /MG Campus Divinópolis. (e-mail:wandao007@hotmail.com)

**Graduação em Engenharia Mecatrônica

CEFET /MG Campus Divinópolis. (e-mail:lucasalmeidaj@hotmail.com)

*** Professor, Doutor em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
CEFET/MG Campus Divinópolis. (e-mail:claudiohgsantos@gmail.com)

Abstract: With the need for new energy sources, the world is opening up more and more to clean and renewable sources, and it is in this way that solar energy has been increasingly highlighted. The Micro Photovoltaic Power Generation systems are faced with the fact that the photovoltaic modules in their efficiency are usually lower than the nominal efficiency of the manufacturer. The performance of these modules is directly dependent on numerous factors, such as solar irradiation, shading, angular inclination and especially temperature variation. In this way, their performance is reduced, obtaining fluctuating results during their capture and preventing their greater efficiency, practically preventing their maximum power throughout the day. Due to this fact, this work aims to present a study of the generation in photovoltaic modules reporting the influence of the temperature of the modules themselves on the system efficiency, and seek results according to the type of structure where the modules are fixed. Checking the performance in modules whose fixation allows better ventilation and heat transfer to the environment, and also in those that do not have a fixation that allows cooling.

Resumo: Com a necessidade de novas fontes energéticas, o mundo se abre mais e mais para fontes limpas e renováveis, e é assim, em um crescente que a energia solar vem se destacando. Os Sistemas de Micro Geração de Energia Fotovoltaica, se deparam com o fato de que os módulos Fotovoltaicos em sua eficiência normalmente são menores do que a eficiência nominal do fabricante. O rendimento destes módulos ficam diretamente dependentes a inúmeros fatores, como irradiação solar, sombreamento, inclinação angular e principalmente a variação de temperaturas. Deste modo, diminui se o rendimento dos mesmos, obtendo resultados flutuantes durante sua captação e impedindo a sua maior eficiência, praticamente impossibilitando a sua máxima potência durante todo o dia. Mediante a este fato este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo da geração em módulos Fotovoltaicos relatando a influência da temperatura dos próprios módulos na eficiência do sistema, e buscar resultados de acordo com o tipo de estrutura onde os módulos são fixados. Verificando o desempenho em módulos cuja fixação possibilita uma melhor ventilação e transferência de calor para o ambiente, e também naqueles que não tem uma fixação que possibilite um arrefecimento.

Keywords: Renewable Sources; Micro Generation; Photovoltaics; Modules; Temperature.

Palavras-chaves: Fontes Renováveis; Micro Geração; Energia Fotovoltaica; Módulos; Temperatura.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os recursos energéticos renováveis explorados na atualidade, o de maior repercussão e de considerável aumento em demanda, tem sido a energia solar. É por este motivo que o desenvolvimento tecnológico a cerca deste recurso tem ganhado a cada dia mais notoriedade e dedicação dos pesquisadores e entusiastas do meio, principalmente à nível de sustentabilidade devido seu baixo impacto ambiental, como descrito por Nascimento (2017). A energia solar se mostra uma solução cada vez mais comum para a crise energética que já existe em determinadas localidades. No Brasil o número de usuários de energia fotovoltaica vem crescendo, principalmente após a publicação da resolução 482 por parte da ANEEL, citado por Zanetti Neto et al.

(2012), a qual determina as condições gerais para a mini e micro-geração em todo território nacional. Através da regulamentação da ANEEL, vieram diversos facilitadores que incentivam e aumentam os interessados em poder gerar a sua própria energia.

Contudo, por mais que os materiais necessários para fabricação e instalação de módulos Fotovoltaicos se tornem acessíveis, a evolução das células para melhorar sua eficiência é primordial a fim de otimizar a instalação de um Sistema Fotovoltaico. A evolução dos módulos é constante e cada vez mais rápida, hoje comercialmente são encontrados módulos com eficiência média entre 16,97% e 21,40%, segundo dados da fabricante Canadian Solar (2020). Para suprir as deficiências de rendimentos nominais dos módulos

Fotovoltaicos, se faz necessário criar métodos para melhorar a eficiência de geração dos Sistemas Fotovoltaicos através implementos, como de rastreadores solares, de Sistemas híbridos, aperfeiçoamento por algoritmos de MPPT, incrementos com Sistemas de resfriamento dos módulos, Análise e estudo da reflexão de raios e estudos térmicos.

Uma variável predominante que influenciam na potência dos módulos Fotovoltaicos está relacionada com a temperatura de operação nos módulos Fotovoltaicos, essa é a problemática que se levanta em situações que ocorrem o aumento da temperatura irradiada, consequentemente ocasionando perda de potência e eficiência no sistema.

Pode-se observar na figura 1 (a), que demonstra dados da fabricante Canadian Solar (2020), que a irradiância influencia diretamente na corrente e na tensão do módulo, onde quanto maior da irradiância, maior é a variação da corrente em relação a tensão.

Na figura 1 (b), temos a relação da temperatura com a tensão e a corrente, onde pode-se observar uma pequena alteração na corrente conforme o aumento da temperatura, e uma considerável queda de tensão na medida que a temperatura se eleva. Conforme estudos de Bodnár; Koós (2018), a eficiência de um módulo é beneficiada por temperaturas menores.

É neste cenário que este trabalho propõem um estudo e o monitoramento de Sistemas Fotovoltaicos, aplicando o resfriamento passivo, cujo sistema pode ser beneficiado por correntes de ar naturais por meio de ajuste na altura dos módulos com relação ao telhado ou à estrutura na qual este sistema foi fixado, assim obtendo uma redução na temperatura e consequentemente um ganho de potência.

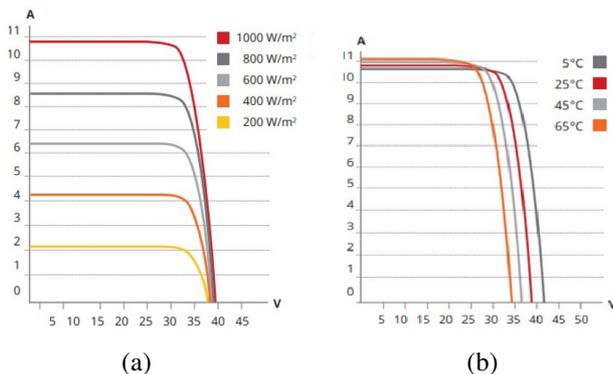


Fig. 1 Relação VxI para variações de: a) irradiância, b) temperatura.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A tecnologia de energia fotovoltaica no âmbito de sua unidade geradora, os módulos Fotovoltaicos, são caracterizados pela baixa eficiência de conversão com sua referência nominal. Os módulos comerciais atuais, possuem índices de eficiência próximos de 21,50% durante o fluxo de captação de irradiação solar diária que é convertido

efetivamente em eletricidade. Com isso parte dessa energia não convertida é transformada em calor, que aquece o módulo e causa um problema indesejável, como a queda de potência e consequentemente a queda de eficiência dos mesmos.

Existem alguns meios alternativos de se evitar um excessivo aumento na temperatura do módulo e possivelmente trazer um melhor aproveitamento do fluxo solar. Uma dessas formas, seria proporcionar um melhor arrefecimento natural aos mesmos a qual, pode trazer benefícios e por isso a distância entre a estrutura de fixação dos módulos, e à superfície base a ser fixados, que na maior parte das vezes é no telhado, acabam influenciando na troca de calor desses módulos com o ambiente.

3. OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo, estudar, analisar e determinar através de cálculos e observações, a influência da temperatura e da estrutura de fixação no desempenho de módulos Fotovoltaicos. Para tais objetivos, este trabalho será dividido em seções que seguem através: do estudo por meio de revisão da termodinâmica de modelos térmicos de Sistemas Fotovoltaicos e os respectivos cálculos analíticos termodinâmico e correlação com o desempenho dos módulos Fotovoltaicos; por revisão nos tipos de fixações em telhado e inclinações para módulos Fotovoltaicos; por observação em montagem, analisando variações de posicionamento na estrutura e coleta de dados; por análise de resultados e conclusões.

4. PERDAS EM SISTEMA FOTOVOLTAICOS DEVIDO A TEMPERATURA

Para Pinho; Galdino (2014) os módulos Fotovoltaicos dificilmente trabalham em suas condições ideais, a variação da temperatura ambiente e a incidência de irradiação solar implicam em uma modificação dos parâmetros de saída das células que compõem os módulos. O aumento na temperatura é diretamente ligado a tensão, trazendo como consequência a elevação na temperatura uma queda considerável na mesma.

A corrente entretanto é diretamente ligada à irradiância solar, sofrendo um aumento conforme a irradiância é maior, porém, não é o suficiente para compensar a grande queda de tensão causado pela temperatura. Segundo dados de DGS (2014), para minimizar perdas decorrentes da elevação na temperatura, os módulos Fotovoltaicos devem ser instalados de forma que favoreça a dissipação de calor. A maneira como é realizado posicionamento dos módulos tem influência direta à sua eficiência. Em um sistema com uma boa ventilação temos um menor acréscimo na temperatura, e consequentemente uma queda menor na produtividade do módulo, representado pelo índice de produção. A demonstração deixa claro a grande diferença que um sistema pode sofrer, representando variações com aumento de mais de 30°C na temperatura, além de perdas na produtividade que podem chegar até 8,9%.

4.1 Transferência de Calor

A energia térmica é a fração da energia interna que a partir de uma diferença de temperatura pode ser transferida de um determinado corpo para outro. O processo denominado transferência de calor é de forma simples, o fato que se for colocado um corpo em um ambiente e estes estiverem em temperaturas distintas haverá uma troca de energia, comumente chamada de “calor”. Segundo Shapiro et al. (2005), transferência de calor é a energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Assim, sempre que houver diferença de temperatura entre corpos, existirá troca de calor, essa transferência de calor pode ocorrer de três formas: condução, convecção e radiação, variando conforme o ambiente e materiais. Dessa forma pode ocorrer entre sólidos ou fluidos, sólidos separados por fluidos, fluidos separados por uma superfície sólida e também entre superfícies sólidas separadas pelo vácuo.

4.1.1 Transferência de Calor por Condução

A transferência através da condução ocorre a partir da atividade atômica e molecular, onde há transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas com menor energia através do contato. Portanto a transferência por condução acontece do meio com maior temperatura para a menor temperatura, como demonstrado na figura 2, podendo ocorrer em materiais sólidos, líquidos ou gasosos. A equação que descreve a taxa de transferência de calor por condução é conhecida como Lei de Fourier (Shapiro et al., 2005).

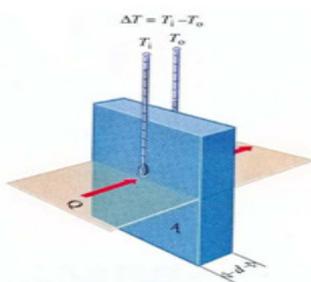


Fig. 2 Transferência de calor por condução. (ISFC, 2016).

Equation Section (Next)

$$Q_{\text{cond}} = \frac{-kA\Delta T}{e} \text{ Equation Section (Next)}$$

e : espessura do material

k: condutividade térmica

A: área superficial

ΔT: diferença de temperatura entre as paredes do material

4.1.2 Convecção

Transferência de calor por convecção é o nome dado ao tipo de transferência que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento desde que estejam em temperaturas diferentes. Tal modo de transferência de energia térmica ocorre através de dois mecanismos, sendo pela condução, devido ao movimento molecular aleatório, e também pelo

movimento macroscópico do fluido, movimento este que favorece a transferência de calor, devido ao fato que uma grande quantidade de moléculas estão se movendo em um curto período de tempo. De forma simples, podemos citar a existência de convecção através do uso de ventoinhas, bombas centrífugas e também pela diferença de densidade decorrente do próprio aumento de temperatura do fluido, sendo as duas primeiras chamadas de convecção forçada, pois vem de meios externos, e a última conhecida como convecção natural. Pode-se explicar a convecção através da equação conhecida como Lei do resfriamento de Newton (Incropera; Dewitt; Bergman, 2000).



Fig. 3 Transferência de calor por convecção natural. (Solidworks, 2019)

$$Q_{\text{conv}} = \bar{h}A_{\text{sup}}(T_s - T_{\text{atm}})$$

A_{sup} : Area da superfície

\bar{h} : Coeficiente convectivo médio

T_s : Temperatura superficial

T_{atm} : Temperatura da atmosfera

Por se tratar de módulo Fotovoltaico, deve-se considerar que o processo convectivo acontece de forma distinta na parte frontal e posterior do mesmo. Dessa forma, a partir de estudos Ferreira (2018) obteve o número de Nusselt médio para módulos Fotovoltaicos em condições de convecção natural.

$$\overline{Nu}_L = [0,68 + \frac{0,67Ra_L^{1/4}}{[1 + (0,492/P_r)^{9/16}]^{4/9}}]$$

Ra_L : Número de Rayleigh

P_r : Número de Prandtl

Conforme Incropera; Dewitt; Bergman (2000), a partir do valor obtido com Número de Nusselt, e utilizando esta equação, é possível obter o valor do coeficiente convectivo médio \bar{h} , onde:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k}$$

\bar{h} : Coeficiente convectivo médio

L: Comprimento característico

k: Coeficiente de condutividade térmica

4.1.3 Radiação

É denominado radiação térmica, toda e qualquer energia emitida cujo o comprimento de onda varie entre 0,1 e 100 μm do espectro eletromagnético, como demonstrado na figura 4. A transferência de calor por radiação térmica ocorre através de sólidos e líquidos não opacos à irradiação térmica, gases e também no vácuo. A energia radiante que um corpo emite é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann. (Incropera; Dewitt; Bergman, 2000).

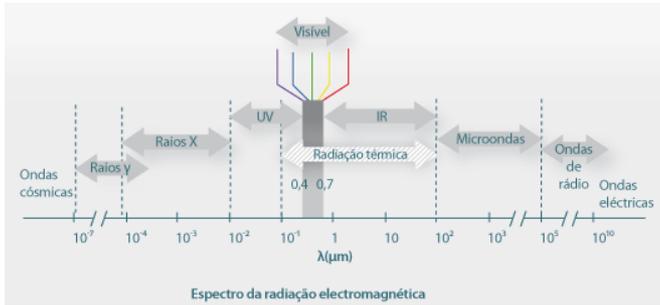


Fig. 4 Espectro da radiação Eletromagnética (Coimbra, 2018).

$$Q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T_s^4$$

σ : Constante de Stefan Boltzmann

ε : Emissividade

T_s : Temperatura da superfície

Da mesma forma que acontece na transferência por convecção, na radiação também temos valores distintos de irradiação para a parte frontal e posterior do painel, já que a área frontal do painel emite para o céu e a parte posterior para o solo ou telhado, assim temos a equação de transferência de calor por irradiação, em virtude da troca de calor para vizinhança através da radiação (Ferreira, 2018).

Rescrevendo a equação da radiação térmica, levando se em conta os fatores de forma dos dois tipos de troca de calor entre o ar e o solo, onde seus valores dependem do ângulo de inclinação dos módulos (Kant et al., 2016).

$$F_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)$$

$$F_2 = \frac{1}{2}(1 - \cos(\pi - \beta))$$

F1, F2: Fatores de forma

β : Angulo de inclinação do módulo

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{Q}_{r,ceu} + \dot{Q}_{r,solo}$$

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \varepsilon_{vidro} A_{sup} F_1 (T_s^4 - T_{ceu}^4) + \sigma \varepsilon_{base} A_{sup} F_2 (T_s^4 - T_{solo}^4)$$

Percebe-se após uma análise que os valores de F1 e F2 são iguais, portanto a equação da radiação térmica pode ser reescrita na forma:

$$\dot{Q}_{rad} = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) \sigma A_{sup} [\varepsilon_{vidro} (T_s^4 - T_{ceu}^4)$$

$$+ \varepsilon_{base} A_{sup} F_2 (T_s^4 - T_{solo}^4)]$$

σ : Constante de Stefan Boltzmann

ε : Emissividade

T_{solo} : Temperatura ambiente

Onde ε_{vidro} representa a emissividade do vidro da superfície e ε_{base} a emissividade do fluoreto de polivinil que está presente na parte posterior do módulo. Com relação às temperaturas, segundo Biwole; Woloszyn; Pompeo (2008) a temperatura do céu, T_{ceu} , é definida pela equação, onde a temperatura do solo, T_{solo} , pode ser considerada a temperatura ambiente. Já para a temperatura equivalente do céu, em geral, seu valor é mais baixo que a temperatura ambiente medida:

$$T_{ceu} (C^\circ) = 0,037536^{1.5} (C^\circ) + 0,32_{atm} (C^\circ)$$

5. MODELAGEM DE OPERAÇÃO TÉRMICA DO MÓDULO SOLAR

Diversos trabalhos abordando a temperatura de operação de módulos Fotovoltaicos já foram realizados, em Al Tarabsheh et al. (2013), o sistema de células fotovoltaicas é resfriado através do escoamento de um fluido no interior da tubulação. Já em Bodnár; Koós (2018) foram feitos testes aplicando resfriamento por aplicação de ar forçado através de tubulações na parte inferior dos módulos. Entretanto com a grande variação da intensidade solar no planeta muitos modelos devem ser frequentemente calibrados de forma experimental e geralmente apresentam dados restritos a região onde foi realizado o estudo. Desta forma, pode-se observar presente na literatura, recomendações da utilização de modelos térmicos dinâmicos, baseados em balanço de energia transiente do processo, pois estes apresentam dados mais fiéis a realidade com relação a modelos permanentes (Jakhriani et al., 2011).

5.1 Balanço de Energia em um Módulo Solar

Observa-se na figura 5 o balanço de energia aplicado a um módulo solar, onde temos a irradiação total recebida por ele, bem como as formas da transferência de calor presente no sistema, a potência de energia gerada e também o aumento interno de energia. Para este modelo assume-se que a irradiância recebida pelo módulo se distribui igualmente por toda sua extensão. A partir disso podemos observar que da irradiância total recebida por um módulo apenas uma parte efetivamente se converte em eletricidade, sendo o restante dissipado em forma de convecção e radiação, ou contribuindo para o aumento da energia interna do módulo, elevando sua temperatura, através destas relações atribuiu-se a equação que representa o balanço de energia no módulo.

$$\dot{Q}_s - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{P}_e) = \dot{U}_{sist}$$

\dot{Q}_s : Irradiação total

\dot{Q}_c : Perda para a vizinhança por convecção

\dot{Q}_r : Perda para a vizinhança por irradiação

\dot{P}_e : Potência de saída

\dot{U}_{sist} : Aumento da energia interna do módulo

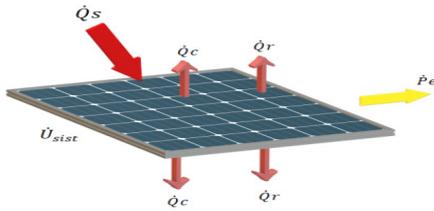


Fig. 5 Balanço de Energia em um módulo Fotovoltaico. Adaptado: Masón- Hernández et al. (2013).

5.2 Eficiência de Conversão do Módulo

A potência de saída do módulo, é por definição a parcela da energia solar total incidente na superfície do mesmo, compensado por sua eficiência de conversão. Devido a isso, existem nas literaturas diversas aproximações e correlações a fim de definir a relação entre o aumento de temperatura e a diminuição da eficiência nos módulos Fotovoltaicos, uma das mais utilizadas é linear e veem da associação entre a eficiência nominal da célula com o produto de seus devidos coeficientes mais o coeficiente de radiação solar com o produto das temperaturas de referência (Dubey; Sarvaiya; Seshadri, 2013).

$$\eta_c = \eta_{ref} \left[\beta_{ref} (T_c - T_{ref}) + \gamma_{ref} \text{Log}G(t) \right]$$

η_c : Eficiência de conversão do módulo

η_{ref} : Eficiência nominal da célula na temperatura de referência

β_{ref} : Coeficiente de temperatura (fornecido pelo fabricante)

γ_{ref} : Coeficiente de radiação solar (fornecido pelo fabricante)

T_c : Temperatura de operação da célula

T_{ref} : Temperatura de referência

5.2. Aumento da Energia Interna do Modelo

Cada material tem uma característica, conseqüentemente cada tipo de matéria necessita de uma quantidade de energia para o aumento de 1 °C em sua temperatura. A capacidade térmica de um corpo é dada pelo Calor Específico, c_p , da substância que o compõe também por sua massa. De forma simples, podemos dizer que quanto menor o calor específico de uma substância, menor será a quantidade de calor necessária para elevar a sua temperatura. (Van Wylen; Sonntag; Borgnakke, 2006).

$$\dot{U}_{sist} = mc_p (\Delta T)$$

m: Massa

c_p : Calor específico

ΔT : Variação da temperature

5.3 Equação Geral para o Balanço de Energia no Módulo

Aplicando a substituição dos termos das equações apresentadas na primeira equação geral para o balanço de energia, obtemos a seguinte equação definitiva.

$$mc_p (\Delta T) = (\tau\alpha - \eta_c) G_{t,i} A_{sup} - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r)$$

Após todas as substituições nos termos, poderemos observar que a energia interna do módulo sofre a influência da temperatura, que está implícita nos termos de dissipação (\dot{Q}_c e \dot{Q}_r).

6. DADOS DOS SISTEMAS

Os dados obtidos e analisados no presente trabalho foram adquiridos através de Geradores reais que utilizam Sistemas Fotovoltaicos, sendo um Gerador composto por 17 módulos fixados diretamente sobre o telhado, denominado como Gerador A, um segundo sistema, denominado como Gerador B, também composta por 17 módulos, porém com sua instalação sobre suportes de inclinação, o terceiro sistema denominado Gerador C, é composto por 42 módulos, sendo destes, 21 fixados diretamente sobre o telhado e 21 sobre estruturas de inclinação. E um quarto Sistema, denominado Gerador D, este por sua vez composto por 122 módulos instalados em suportes de inclinação sobre um talude em uma área aberta.

6.1 Características dos Sistemas Geradores

Serão analisados três Geradores Fotovoltaicos, daqui em diante, Sistemas denominados Geradores A, B e C, estão instalados sobre telhados situados na cidade de Oliveira MG.

Os Sistemas de Geradores A e B estão distantes de 800 metros uma em relação ao outra, sendo cada Gerador com um conjunto de 17 módulos cada. Nos Geradores A e B os módulos estão ligados em um inversor Renovigi 5k Plus respectivamente. Este inversor caracteriza se por possuir duas Mppt's, em ambos Geradores, na primeira Mppt apresenta uma string com 9 módulos em série e a outra Mppt com uma string de 8 módulos em série.

Já no Gerador C temos dois inversores Renovigi 5k Plus, também com duas Mppt's, sendo cada inversor com um conjunto de 21 módulos cada. Na primeira Mppt apresenta uma string, com 11 módulos e na outra Mppt uma string com 10, ambas em série.

A temperatura dos dias de testes desses Sistemas variando de 18 °C a 33 °C em ambiente aberto. Os Sistemas referente aos Geradores A e B ocupam uma área de 34m² cada.

6.2 Módulos

Considera-se que a eficiência dos módulos Fotovoltaicos é avaliada nas condições padrões de teste (STC) com irradiância solar de 1000 W/m² temperatura ambiente média de 25 °C. (Guenounou; Malek; Aillerie, 2016). Em situações críticas, módulos Fotovoltaicos operam em altas temperaturas entre 50 e 100 °C. (Oliveira, 2018).

Os testes foram realizados utilizando módulos da CanadianSolar com potências de 340W. As características de funcionamento do mesmo de acordo com a temperatura em sua superfície.

Alterações das Características pela Temperatura	
Especificações	Dados
Coeficiente de Temperatura (Pmax)	-0,39% / °C
Coeficiente de Temperatura (Voc)	-0,29% / °C
Coeficiente de Temperatura (Isc)	0,05% / °C
Temperatura de Operação Nominal	43 a ±3 / °C

Tabela 1 Especificações referente às Alterações das Características pela Variação da Temperatura. CanadianSolar (2020).

Na tabela 1, apresenta especificações, onde a variação para cada grau Celsius da temperatura nominal do módulo causa variação em sua corrente e tensão, sendo a variação na tensão muito mais significativa.

6.3 Inversores

O inversor presente nos Sistemas Geradores A, B e C é o Renovigi 5k Plus, este inversor possui duas entradas para strings independentes (Ponto Rastreador Potência Máxima) e duas entradas para corrente contínua, na qual temos 99,5% de eficiência de conversão para corrente alternada.

6.4 Análise dos Sistemas Geradores Fotovoltaico Entre as Estrutura de Fixação dos Módulos Fotovoltaicos



Fig. 6 Sistemas Fotovoltaicos (a) com estruturas fixas no telhado - Gerador A; (b) com estruturas espaçadas e sobre o telhado - Gerador B.

Na figura 6, são mostrados respectivamente os Geradores A e Gerador B, ambos com inclinação dos módulos de 10° em

relação a horizontal. O Gerador A composta por 17 módulos fixados diretamente sobre o telhado e o Gerador B também composta por 17 módulos, porém com sua instalação sobre suportes de inclinação.

O terceiro Sistema, denominado Gerador C, ilustrado através do simulador PVSol.

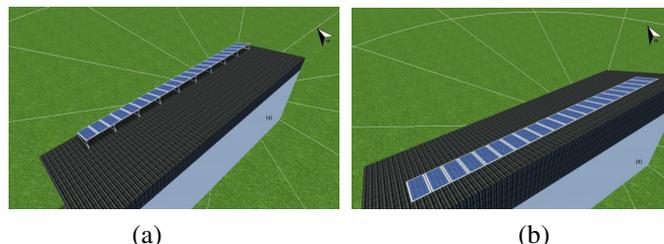


Fig 7 Sistema Fotovoltaico Gerador C simulado no PVSol 3D. (a) com estruturas elevadas sobre o telhado; (b) com estruturas fixadas junto ao telhado;

Na figura 7 são ilustrados dois cenários do mesmo sistema do Gerador C, o qual é composto por 42 módulos, sendo destes, 21 fixados diretamente sobre o telhado e 21 sobre estruturas de inclinação.

7. RESULTADOS

As análises e resultados deste trabalho estão divididos em seções, onde são comparados dados dos Geradores A, B e C, com aproximações realizadas matematicamente através do software MatLAB com a aplicação da equação geral para o balanço de energia no módulo, através destes resultados, serão expostos valores e pareceres sobre as ações da temperatura nos módulos Fotovoltaicos.

7.1 Equação Geral e seus Termos

Para realizar os cálculos a fim de obter a perda de temperatura de um módulo, inicialmente foi necessário obter todos os parâmetros e aplicá-los, para assim aproximar o resultado de forma satisfatória. Dessa forma, podemos enumerar os itens necessários para realizar substituições e aplicar nas equações de irradiância solar e na equação geral para balanço de energia no modulo dos Geradores A, B e C, da seguinte maneira:

$$\tau\alpha : 0.6 \text{ (Ferreira, 2018)}$$

$$G_{t,i} : 1.000 \text{ W/m}^2 \text{ (Canadiansolar, 2020)}$$

$$A_{sup} : 2\text{m}^2 \text{ (Canadiansolar, 2020)}$$

$$T_s : \text{Varável de } 40 \text{ a } 90 \text{ oC}$$

$$L : 2 \text{ m (Canadiansolar, 2020)}$$

$$k : 0.02523$$

$$\overline{Nu}_L : 2.2 \text{ (Oliveira, 2018)}$$

$$\sigma : 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ (Incropera; Dewitt; Bergman, 2000)}$$

$$\varepsilon_{vidro} : 0.78 \text{ (Incropera; Dewitt; Bergman, 2000)}$$

$$\varepsilon_{baseo} : 0.93 \text{ (Incropera; Dewitt; Bergman, 2000)}$$

$$T_{solo} : 32 \text{ oC}$$

$$\beta : 10^\circ$$

η_c : 17.14% (Canadiansolar, 2020)

m: 25 kg (Canadiansolar, 2020)

c_p : 0.16 (Incropera; Dewitt; Bergman, 2000)

Devido as dificuldades e pouca disponibilidade de valores precisos sobre valores de \overline{Nu}_L e seus parâmetros, foram realizadas aproximações para um dia claro, sem nuvens no horário de sol pleno da primavera, que para a região da pesquisa é de 11:00 as 14:00 horas. O valor de \overline{Nu}_L foi encontrado na bibliografia (Oliveira, 2018) calculado a partir de características similares ao utilizado nesse experimento (convecção natural em regime laminar para placa inclinada a 10°), pois seu valor não é fixo e sua variação acontece em tempo real. Como \overline{Nu}_L é dependente de vários outros termos, para seu cálculo seria necessário a utilização de uma estação de estudo, para captação de dados climáticos constantemente, como inclinação do sol em relação aos módulos, velocidade e orientação do vento, intensidade de iluminação, entre outros. Então, utilizando o software MatLAB, foi encontrado o valor da redução na temperatura em um módulo a partir dos parâmetros listados acima, e aplicados na equação geral, resultando em uma queda na temperatura média de 5.4°C , representando numericamente um ganho em potência para o módulo de 2,1%.

$$T = \frac{(\tau\alpha - \eta_c) G_{t,i} A_{sup} - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r)}{mc_p}$$

7.3 Sistemas Fotovoltaicos Geradores A e B

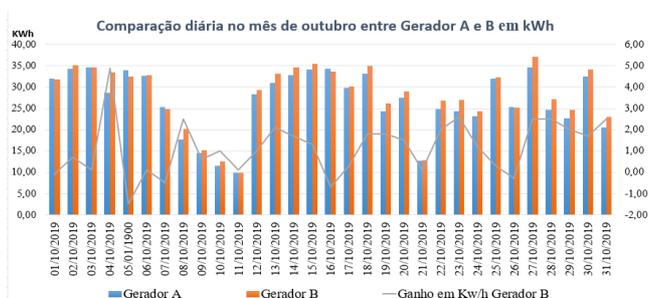


Fig. 8 Gráfico com Ganho em Kwh da diferença entre Geradores A e B

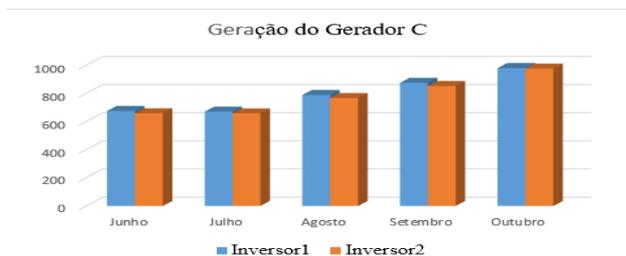


Fig. 9 Gráfico Gerador C

Na figura 8, mostra resultados da comparação diária entre os Sistemas Fotovoltaicos, referente aos Geradores A e B. Onde foi possível obter a diferença entre as gerações e o ganho em kWh em que um sistema com menor temperatura, tem sobre

o outro, observando assim, que em um mês o sistema do Gerador B obteve uma geração de 35,8 kWh maior em relação ao sistema do Gerador A, o que representa um ganho de 3.91%.

7.2.2 Sistema Fotovoltaico Gerador C

Os resultados obtidos no Gerador C mostrados na figura 14, são similares aos encontrados nos Geradores A e B, temos uma geração ligeiramente superior do sistema cujo os módulos encontram-se suspensos. Numericamente temos que sistema do inversor 1 obteve uma geração de 15,7 kWh em média mensal, maior que o inversor 2, representando um ganho de 1.96%, totalizando no ano até então um ganho de 78,6 kWh.

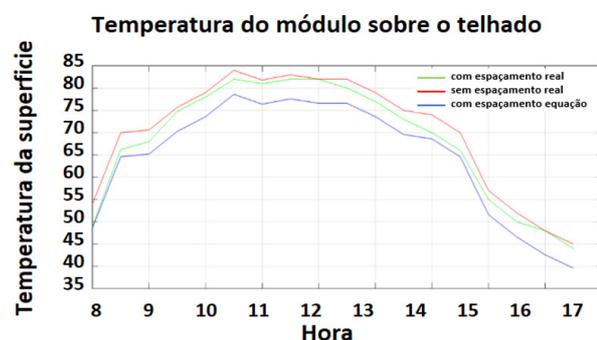


Fig. 10 Curvas relacionando as temperaturas do módulo

Na figura 10, são mostrados resultados teóricos e comparados com resultados experimentais onde foram confrontadas as temperaturas dos módulos de um determinado Sistema Fotovoltaico, que daqui em diante será denominado como Gerador C, as suas medições foram realizadas no dia 27 de outubro de 2019 com intervalo de meia hora entre cada uma.

O Gerador C, possui parte de seus módulos suspensos, representados pela curva verde e outra parte dos módulos não suspensos, representados pela curva vermelha. Também na figura apresenta uma curva azul, representando a temperatura do módulo com uma diferença constante de temperatura mediante a cálculos.

Então, utilizando o software Matlab e aplicando a equação geral, de perda de temperatura em módulos Fotovoltaicos, a partir dos parâmetros apurados, foi encontrado o valor da redução na temperatura em um módulo, resultando em uma menor temperatura média de 5.4°C , teoricamente representando um ganho em potência para o módulo de 2,1% observado pela curva azul.

É possível observar, na figura 10, de acordo com tais cálculos, demonstrado através da curva azul, que a temperatura do módulo suspenso deveria ser bem inferior, ao que foi apresentado na realidade, na curva verde, isso devido diversas aproximações nos cálculos, interferindo consideravelmente o resultado final, assim, apesar das diferenças, conclui se que o sistema é sim beneficiado por uma redução de temperatura proporcionada pela elevação da estrutura dos módulos em relação ao telhado. Mas,

reforçando que essa diferença de temperatura é menor do que foi apresentada por meio da equação, se mantendo em uma diferença média inferior a 3 °C.

8. CONCLUSÕES

No presente trabalho fica perceptível que a melhoria na eficiência dos módulos se mostra como um grande passo na evolução de instalações de Sistemas Fotovoltaicos. Como observado nos resultados é sim possível se beneficiar de um sistema com uma melhor refrigeração natural e, como o esperado, apesar de pequenos os ganhos são existentes. Foi possível observar que a diferença de geração entre os Geradores A e B foi maior do que a apresentada no Gerador C, isso pode ser ocasionado pelo fato de estarem próximas, mas não exatamente no mesmo local, o que faz com que possam sofrer com diferenças pontuais de passagem de nuvens sobre um sistema e no outro não, além de uma pequena diferença na altitude o que pode influenciar na geração durante o nascer e o pôr do sol. O ganho de produtividade mesmo mediante a temperatura mais elevadas é significativo.

REFERÊNCIAS

- Al tarabsheh, A. et al. Investigation of temperature effects in efficiency improvement of non-uniformly cooled photovoltaic cells. *Chemical Engineering Transactions*, [S.l.], v.35, 2013.
- Aneel, A. d. E. E. d. B. Agência Nacional de Energia Elétrica. ANEEL, Brasília, Brasil. 3aEd, [S.l.], 2008.
- Biwole, P. H.; Woloszyn, M.; Pompeo, C. Heat transfers in a double-skin roof ventilated by natural convection in summer time. *Energy and Buildings*, [S.l.], v.40, n.8, p.1487–1497, 2008.
- Bodnár, I.; Koós, D. Determination of temperature coefficient and transient electrical characteristics of a cooled and non-cooled solar module. In: *INTERNATIONAL CARPATHIAN CONTROL CONFERENCE (ICCC)*, 2018. Anais. [S.l.: s.n.], 2018. p.570– 573
- Canadiansolar. Super High Power Poly Perc Module. Painel Solar Canadian. https://canadiansolar.com.br/la/wp-content/uploads/2020/03/PT_CanadianSolar_KuMax_CS3U-P_v5.6_F16_J2.pdf.
- Coimbra, U. de. Portal de Engenharia Universidade de Coimbra Transferência de Calor. 2018.
- DGS. Planning and installing photovoltaic system: a guide for installers, architects and engineers. *International Journal of Environmental Studies*, [S.l.], v.71, 11 2014.
- Dubey, S.; Sarvaiya, J. N.; Seshadri, B. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review. *Energy Procedia*, [S.l.], v.33, p.311–321, 2013.
- Ferreira, R. A. M. Metodologia para avaliação do desempenho de painéis Fotovoltaicos utilizando um odelo elétrico-térmico e termografia quantitativa. Belo Horizonte - MG. TESE (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais– MG, [S.l.], 2018.
- Guenounou, A.; Malek, A.; Aillerie, M. Comparative performance of PV panels of different technologies over one year of exposure: application to a coastal mediterranean region of algeria. *Energy Conversion and Management*, [S.l.], v.114, p.356–363, 2016.
- IFSC. Calor, energia e transferência de calor. 2016.
- Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L. *Fundamentos de Transferência de Calor E de Massa*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- Jakhriani, A. et al. Comparison of solar photovoltaic module temperature models. *World Applied Sciences Journal*, [S.l.], v.14, n.3, p.1–8, 2011.
- Kant, K. et al. Heat transfer studies of photovoltaic panel coupled with phase change material. *Solar Energy*, [S.l.], v.140, p.151–161, 2016.
- Mazón-Hernández, R. et al. Improving the electrical parameters of a photovoltaic panel by means of an induced or forced air stream. *International Journal of Photoenergy*, [S.l.], v.2013, 2013
- Oliveira, J. G. G. d. *Convecção mista em painéis Fotovoltaicos*. , [S.l.], 2018.
- Pinho, J. T.; Galdino, M. A. *Manual de engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro, [S.l.], v.1, p.47–499, 2014.
- Shapiro, H. N. et al. *Introdução à engenharia de Sistemas térmicos: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor*. Rio de Janeiro, RJ: LTC, [S.l.], 2005.
- SOLIDWORKS. *Análise térmica*. 2019.
- Van Wylen, G. J.; Sonntag, R. E.; Borgnakke, C. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. [S.l.]: Edgard