

MODELAGEM DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM FUNÇÃO DE PARÂMETROS CLIMÁTICOS

PHOTOVOLTAICS MODELING DUE TO CLIMATIC PARAMETERS

Amaury Souza¹, Ana Paula Garcia Oliveira², Ataur Rahman³, Mahmudul Haque⁴

RESUMO

A produtividade de energia fotovoltaica (PVE) é avaliada usando as variáveis climáticas simuladas com aerossol, índice de claridade e irradiância solar e um modelo para o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. A análise indica que as reduções de emissões de aerossóis em um futuro próximo resultarão no aumento do aquecimento global, e uma resposta significativa da radiação solar superfície e produtividade PVE associado. As mudanças na produtividade de radiação e PVE solar de superfície estão relacionadas com efeitos globais de redução de aerossóis sobre a circulação em grande escala e padrão de cobertura de nuvens associada, ao invés de efeitos locais sobre as propriedades ópticas atmosféricas. Avaliação PVE é então discutido no quadro da situação atual e do mercado fotovoltaico, destacando que os efeitos sobre a produtividade induzidas por políticas industriais e públicas, e desenvolvimento tecnológico são comparáveis aos efeitos relacionados com o clima. Os resultados apresentados incentivam a melhoria e posterior utilização dos modelos climáticos na avaliação da disponibilidade futura para energias renováveis.

PALAVRAS-CHAVE: *Modelo climático. Alterações Climáticas. Energia fotovoltaica. Aerossóis.*

ABSTRACT

Photovoltaic energy productivity (PVE) is evaluated using simulated climatic variables with aerosol, clarity index and solar irradiance and a model for the performance of photovoltaic systems. The analysis indicates that the aerosol emission reductions in the near future result in an increase in global warming and a significant response of the solar surface radiation and associated PVE productivity. Changes in radiation surface and productivity of solar PVE are related to overall reduction aerosol effects on the circulation and large scale associated with cloud coverage pattern, rather than local atmospheric effects on optical properties. PVE evaluation is then discussed in the context of the current situation and the PV market, highlighting the effects on productivity induced by industrial and public policies, and technological development are comparable to the effects related to the weather. The results presented encourage the improvement and further use of climate models in the assessment of future availability for renewable energy.

KEYWORDS: *Climate Model. Climate change. Energy system. Aerosols.*

1 Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Departamento de Física.
E-mail: amaury.de@uol.com.br.

2 Pós-Graduação Stricto Sensu em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional da Universidade Anhanguera-Uniderp.
E-mail: apg.bio@gmail.com.

3 Water and Environmental Engineering School of Computing, Engineering and Mathematics Centre for Infrastructure Engineering Western Sydney University, Australia. E-mail: a.rahman@westernsydney.edu.au.

4 Institute for Infrastructure Engineering, Western Sydney University. E-mail: mahmudul.haque@waternsw.com.au.

INTRODUÇÃO

A capacidade de determinar com precisão o desempenho de um sistema fotovoltaico (PV) é importante para o cumprimento das obrigações contratuais de compradores e vendedores, para determinar mudanças no desempenho que ocorreram ao longo do tempo. Além disso, as mesmas técnicas podem ser incorporadas em modelos de melhor desempenho e de previsões mais precisas de rendimento de energia.

Um dos maiores desafios é como avaliar os impactos que podem ocorrer como consequência do aumento projetado na intensidade de eventos climáticos extremos: a maioria das metodologias atuais confia na experiência do passado, mas isso pode não ser suficientemente um bom guia para o planejamento operacional de atividades nas próximas décadas. Além disso, as avaliações de impacto do clima sobre planejamento e operação de energia precisa levar em conta um maior número de cenários, bem como investigar os impactos sobre segmentos específicos de energia (SCHAEFFER et al., 2012).

Portanto, é importante identificar os segmentos de energia para o qual tenha sido conduzida pesquisas com pouco impacto no clima. Finalmente, a avaliação do impacto climático para sistemas de energia é um campo relativamente novo de pesquisa, espera-se que os desenvolvimentos metodológicos vão aumentar no futuro próximo, com a consequente ampliação da base de conhecimento sobre o assunto.

Principalmente as nuvens influenciam na variabilidade do desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Porém, as variações também existem para dias com céu claro com diferentes quantidades de constituintes atmosféricos que absorvem e refletem diferentes quantidades de radiação, que passam através da atmosfera da Terra.

A medida da atenuação é determinada pela massa de ar e pela quantidade de vapor de água, aerossóis e ozônio da atmosfera para um determinado dia e de localização. Esses componentes absorvem seletivamente a radiação de comprimentos de onda específicos, logo, seu impacto no desempenho PV é sensível à resposta espectral do dispositivo fotovoltaico. Embora os impactos sejam geralmente pequenos, eles podem apresentar tendências sazonais ou geográficas que aumentam a variabilidade nas medições de desempenho PV de época para época, por localização, ou, em alguns casos, de dia para dia.

A relação entre as energias renováveis (ER) e o clima tem sido frequentemente investigada na perspectiva do impacto no clima global decorrente de um

aumento da penetração das fontes renováveis na matriz energética mundial, e a redução associada nas emissões de dióxido de carbono (IPCC, 2011; UNECA, 2011). A possibilidade de substituir integralmente a energia pré-existente tem sido explorado (JACOBSON & DELUCCHI, 2011; DELUCCHI & JACOBSON, 2011), o que sugere que as barreiras para o desenvolvimento de um plano desse tipo são principalmente sociais e políticas (JACOBSON & ARCHER, 2012).

Por outro lado, os limites tecnológicos e econômicos para a alta penetração de ER no sistema de energia elétrica ainda existem (EUROPEAN CLIMATE FOUNDATION, 2010), principalmente sobre a armazenagem, flexibilidade da rede e energia necessária para incorporar a geração de eletricidade a partir de fontes intermitentes na rede de transporte (DENHOLM et al., 2011).

No entanto, a relação tem um segundo sentido. Como também é esperado a mudança climática pode agir sobre as variáveis meteorológicas em última análise, que regulam a disponibilidade e localização geográfica dos vários recursos renováveis. A literatura científica sobre este tema é relativamente escassa e o próprio IPCC indicou que "a mudança climática terá impactos sobre o tamanho e a distribuição geográfica do potencial técnico de fontes de energia renováveis, mas a investigação sobre a magnitude destes efeitos possíveis é incipiente" (IPCC, 2011).

Com a expectativa gerada por módulos solares fotovoltaicos, está ocorrendo um crescimento rápido e consequentes investimentos estão sendo mobilizados pelo setor fotovoltaico. Assim, faz-se necessário analisar como e em que medida o potencial fotovoltaico atual poderia ser afetado nas próximas décadas por mudanças esperadas nos padrões climáticos, tanto em termos de produção de energia quanto da vulnerabilidade da infraestrutura (PATT et al., 2013). No entanto, apesar do interesse crescente, poucos estudos investigaram diretamente o impacto das alterações climáticas na produção de energia fotovoltaica, em comparação com outras fontes renováveis como a hidráulica e eólica (SCHAEFFER et al., 2012; SOUZA et al., 2016; SOUZA et al., 2017).

A produtividade de energia fotovoltaica (PVE) está relacionada à radiação solar e da temperatura na superfície dos módulos fotovoltaicos. A radiação solar e da temperatura são, por sua vez, afetadas pelas propriedades ópticas da atmosfera e, em particular, ao seu teor de aerossóis. Com efeito, aerossóis interagem diretamente com a radiação solar através de dispersão e absorção, o que pode ocasionar mu-

danças na temperatura (ANGSTROEM, 1962; HANSEN et al., 1997). Além disso, os aerossóis afetam as propriedades da nuvem, aumentando albedo das nuvens por meio de um aumento no número de gotículas de nuvem e prolongando a vida útil da nuvem por meio da formação de gotículas menores que reduzem a probabilidade de precipitação (ALBRECHT, 1989; TWOMEY, 1997).

A compreensão da química e da dinâmica dos aerossóis e a sua inclusão nos modelos climáticos são passos fundamentais para melhorar a descrição da variabilidade do clima (BRASSEUR et al., 2003). No contexto das alterações climáticas, uma simulação realista da crescente tendência da temperatura observada ao longo do século 20 só é possível considerando o impacto combinado de gases antropogênicos de estufa (GEE) e as emissões de aerossóis (ROECKNER et al., 1999). Uma avaliação confiável das alterações climáticas no curto prazo, ou seja, os próximos 20-30 anos exigem modelos climáticos capazes de incluir corretamente a influência dos aerossóis na temperatura atmosférica (KLOSTER et al. 2008; KLOSTER et al. 2010; RAES & SEINFELD, 2009).

As alterações ambientais advindas do processo de ocupação da terra com as emissões de queimadas é também um foco importante. A floresta interage fortemente com a atmosfera, emitindo e absorvendo gases e partículas e, com isso, alterando o meio físico, químico e biológico dos ecossistemas. Partículas de aerossóis são emitidas naturalmente pela vegetação, e estas são críticas nos mecanismos de produção de nuvens, no balanço de radiação solar e na ciclagem de nutrientes, entre outros processos. Entender os processos naturais que regulam a composição da atmosfera é fundamental para que se possa desenvolver uma estratégia de desenvolvimento sustentável.

Como decorrência das emissões de queimadas, as concentrações atmosféricas de partículas de aerossóis e gases traço aumentam por fatores de 2 a 8 em grandes áreas, o que altera o balanço de radiação, com a absorção de até 70% da radiação fotossinteticamente ativa. Esta redução no fluxo radiativo afeta a taxa fotossintética, a temperatura na superfície e dos fluxos de calor latente e sensível. A deposição de nutrientes é fortemente afetada pela ação antrópica, com aumento significativo da deposição de nitrogênio em áreas alteradas (ARTAXO et al, 2006).

O objetivo deste trabalho foi de avaliar a disponibilidade da produtividade de energia fotovoltaica, com foco sobre a sensibilidade dos recursos PVE

com concentrações de aerossóis antropogênicos e índice de claridade. A PVE foi estimada através de um modelo para o desempenho fotovoltaico, que utiliza como entrada os dados de radiação e temperatura das células, velocidade dos ventos e índice de claridade atmosféricas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização do Sistema Fotovoltaico

O sistema fotovoltaico estudado é constituído por três módulos fotovoltaicos de 100 Wp conectados em paralelo, instalados com suas faces voltadas para o norte geográfico e com um ângulo de inclinação de 33° (Latitude + 10°). O módulo utilizado tem especificações técnicas descritas na Tabela 1. Os dados são fornecidos pelo fabricante para a condição padrão de operação, radiação solar de 1000 W/m² e temperatura de 25 °C, sujeitas a variações de 10% e uma insolação média diária de 4 horas e meia de pico.

Características elétricas (1000 Wm⁻², 25°C, AM 1,5)

Tensão nominal (V_n) - 12 V; Potência máxima (P_{mp}) - 100 Wp; Corrente de curto circuito (I_{sc}) - 6,54 A; Tensão de circuito aberto (V_{oc}) - 21,6 V; Corrente de máxima potência (I_{mp}) - 5,74 A; Tensão de máxima potência (V_{mp}) - 17,4 V;

Características físicas

Número de células em série-36; Número de células em paralelo-2; Dimensões C x L x h (mm)-1310 x 652 x 33,8 mm; Peso (Kg)- 11 kg; TON-(800 Wm⁻², 20oC, AM 1,5).

Medições e Coleta de Dados

Para determinar a eficiência do sistema fotovoltaico foram necessárias as seguintes medições dos parâmetros elétricos e meteorológicos pertinentes ao sistema: Tensão de circuito aberto do sistema (V_{oc}), em Volts; Corrente de curto-circuito do sistema (I_{sc}), em Ampères:

a) Irradiância G_i – paralela ao plano dos módulos (33°), em W.m⁻²; G_h - no plano horizontal, em W.m⁻²;

b) Temperaturas no sistema T_c – temperatura na superfície (vidro) dos módulos que foi considerada como a temperatura na célula, em °C;

c) T_a - temperatura ambiente, em °C; Velocidade do vento (V_v), em ms⁻¹.

Para a realização das medições dos parâmetros elétricos foi desenvolvido um sistema de comando através de relés para desconectar a carga dos módulos fotovoltaicos e obter a tensão de circuito aberto. Para obter a corrente de curto circuito era feito o curto circuito dos módulos. Essas medições foram realizadas em intervalos de 1 hora. A coleta e armazenamento dos dados foram realizados pelos sensores meteorológicos: pluviômetro, piranômetro, anemômetro, termômetro para medir a temperatura ambiente e no módulo (célula), e sensores elétricos para medir a tensão de circuito aberto e a corrente de curto circuito dos módulos e correntes e tensões de entrada e saída dos controladores de cargas e inversores.

Um datalogger foi utilizado também para comandar a abertura e fechamento dos relés com a finalidade de efetuar a leitura da tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito dos módulos. O sistema foi programado para realizar leituras de 10 em 10 segundos dos dados meteorológicos e apresentar a média dos valores em intervalos de uma hora. As leituras da tensão de circuito aberto e da corrente de curto circuito dos módulos fotovoltaicos também foram realizadas a cada hora. A fim de prever a produção de energia dos módulos fotovoltaicos, é necessário prever a temperatura do módulo em função da velocidade do vento, índice de claridade, irradiância total e dos aerossóis.

Foram considerados como variável dependente (Y) os coeficientes por temperatura das células e como variável independente (X), os dias de estudo. A transformação da variável dia na variável ano-centralizada (ano menos o ponto médio do período de estudo) fez-se necessária, já que em modelos de regressão polinomial, os termos da equação frequentemente são altamente correlacionados, e expressar a variável independente como um desvio de sua média reduz substancialmente à autocorrelação entre eles.

Foi realizada análise de tendência da série histórica utilizando-se um modelo de regressão linear múltipla que melhor descreveu a relação existente entre a variável independente X (irradiância, velocidade dos ventos, índice de claridade e profundidade óptica) e a variável dependente Y (temperatura das células) segundo a equação: $Y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \dots + \beta_kX_k + \varepsilon$; onde, k: número de variáveis; X_j : regressores; β_j : estimadores; ε : erro padrão. Como medida de precisão, utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2). A análise dos resíduos confirmou a suposição de homocedasticidade do modelo (MONTGOMERY, 1992; LATORRE & CARDOSO, 2001).

Os dados de profundidade óptica foram obtidos

do Aerossol Robotic Network – AERONET - que é uma rede de monitoramento de aerossóis via sensoriamento remoto operacionalizada pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e pela LOA-Photons. No Brasil, o programa conta com nove estações operacionalizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP). O programa disponibiliza um banco de dados contínuo e de longa duração de propriedades microfísicas e radiométricas de aerossóis para pesquisas relacionadas a aerossóis, correções de imagens de satélites e relações com outros bancos de dados (HOLBEN, 1998).

As medidas de radiação solar em superfície são realizadas através de um fotômetro solar eletrônico Cimel 318, que realiza medidas de radiação direta e difusa nos canais de 340, 380, 440, 500, 675, 870 e 1020nm em várias direções angulares de 15 em 15 minutos e em determinadas posições zenitais e azimutais pré-determinadas. Possui dois colimadores, sendo um para as medições de radiação direta e outro para a radiação difusa, acoplados à cabeça do sensor onde fica posicionada uma roda que acomoda os filtros sensores para os vários comprimentos de onda de medição. A cabeça do sensor está acoplada a um motor zenital e outro azimutal que direcionam os colimadores a posições predeterminadas em relação ao posicionamento do Sol.

A partir dos dados de radiação solar direta em superfície e conhecidos os valores de radiação solar no topo da atmosfera. O termo u relaciona-se à trajetória da radiação na atmosfera terrestre e depende do ângulo zenital de medição no plano da trajetória solar. Conhecidos estes três termos pode-se estabelecer indiretamente o parâmetro profundidade óptica $\tau\lambda$ (SOUZA & SCHUSH, 2001).

Segundo Vermote & Vermeulen (1999), a atuação dos aerossóis na atenuação da radiação solar é mais significativa no canal de 500nm. Tal fato justifica a utilização da profundidade óptica neste comprimento de onda quando se busca considerar a ação dos aerossóis em modelos de transferência radiativa. Considerando este aspecto, neste trabalho foi utilizada a profundidade óptica de aerossóis no canal de 500nm τ_{500nm} , como indicativo de atmosfera contaminada por aerossóis. O índice de claridade (K_t) determina a cobertura do céu, definido como a razão entre a radiação solar incidente (R_g) ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) e a radiação no topo da atmosfera (R_o) ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$).

$$K_t = \frac{R_g}{R_0}$$

O índice de claridade (K_t) foi determinado pelo tipo de cobertura do céu de acordo com a metodologia de Ricieri (1998), em que no intervalo de $0 < K_t < 0,3$, as radiações global e difusa são praticamente iguais e a radiação direta está próxima de zero, classificando o céu nessas condições como nublado. Para $0,3 \leq K_t \leq 0,65$, as radiações, difusa e direta, mantêm-se próximas denominando de céu parcialmente nublado. E entre $0,65 < K_t < 1,0$, a radiação direta se aproxima da global, enquanto a difusa tende ao mínimo nessas condições denominou de céu limpo.

Neste estudo, equação de regressão linear múltipla (MLR) e PCA foram combinados para executar a análise de PCR. Este modelo PCR foi adotado para prever o futuro da demanda de energia. Breve descrição do PCA, MLR e PCR são dadas nas seções seguintes. Análise de componentes principais transforma o conjunto de dados original de n variáveis que são correlacionados entre si em vários graus para um novo conjunto de dados que contém n número de componentes principais não correlacionadas (PCs). Os PCs são funções lineares das variáveis originais de uma forma que a soma dos desvios é igual para ambas as variáveis originais e novas.

Os PCs são sequenciados a partir da maior variância para o mais baixo. O primeiro PC explica a maior quantidade de variância dos dados. A próxima maior variância é explicada pelo segundo PC e assim por diante para todos os n PCs. Os valores de todos os PCs podem ser obtidos pela mesma equação como equações 1 e 2.

Estas duas equações são para um PC 1 e PC 2. Embora o número de computadores e variáveis originais são iguais, normalmente a maior parte da variância do conjunto de dados pode ser explicado por os primeiros computadores que podem ser usados para representar as observações originais. Isto ajuda a reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados original.

$$PC_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = \sum_{i=1}^n a_{1i}x_i \quad (Eq. 1)$$

$$PC_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = \sum_{j=1}^n a_{2j}x_j \quad (Eq. 2)$$

Onde x_1, x_2, \dots, x_n são as variáveis originais no conjunto de dados e um j são os vetores próprios. Os valores próprios são as variâncias dos PCs e a_{ij} coe-

ficientes são os vetores próprios extraídos da covariância ou de correlação matriz do conjunto de dados. Os valores próprios da matriz de dados podem ser calculados pela Equação 3 como mostrada abaixo:

$$|C - \lambda I| = 0 \quad (Eq. 3)$$

Onde C é a matriz de correlação / covariância, é o valor próprio e I é a matriz identidade. Os coeficientes de PC ou os pesos das variáveis no PC são então calculados pela Equação 4:

$$|C - \lambda I| a_{jj} = 0 \quad (Eq. 4)$$

Devido às diferenças nas unidades das variáveis de demanda de energia utilizadas neste estudo, uma matriz de correlação das variáveis foi usada para obter valores e vetores próprios. Os vetores próprios multiplicados pela raiz quadrada dos valores próprios produzir um $n \times n$ matriz de coeficientes, que são chamados cargas variáveis. Importância de cada variável original para um determinado PC é representado por essas cargas.

Além disso, a soma dos produtos das cargas variáveis e os valores das variáveis originais produzem um novo conjunto de valores de dados que são chamadas de pontuação dos componentes. Estes resultados podem ser utilizados nas várias equações lineares como novas variáveis para prever o futuro da demanda de energia.

A análise de regressão múltipla para modelar a relação entre duas ou mais variáveis independentes com uma variável dependente encaixando uma equação linear para os dados observados. A equação geral de um modelo MLR pode ser expressa como abaixo (MONTGOMERY et al, 2001):

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (Eq. 5)$$

Onde Y é a variável dependente, a_i ($i = 0, 1, \dots, n$) são geralmente os parâmetros estimados pelo método dos mínimos quadrados e x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) são as variáveis independentes.

Componentes principais de regressão (PCR)

Na análise PCR, MLR e PCA são combinados em conjunto para estabelecer uma relação entre a variável dependente e os PCs selecionados das variáveis de entrada [PIRES J et al, 2008]. Principalmente de componentes principais obtidos a partir do ACP são tomados como a variável independente na equação de regressão linear múltipla para realizar a análise de PCR. A equação geral de modelo de PCR é como se segue:

$$Y = a_1 \times PC_1 + a_2 \times PC_2 + \dots a_n \times PC_n$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores da distribuição de temperatura da célula, irradiação solar sobre um plano horizontal, o índice de claridade e os aerossóis, em 2013, estão representados graficamente na Figura 1. Esses valores foram utilizados para prever a temperatura da célula PV.

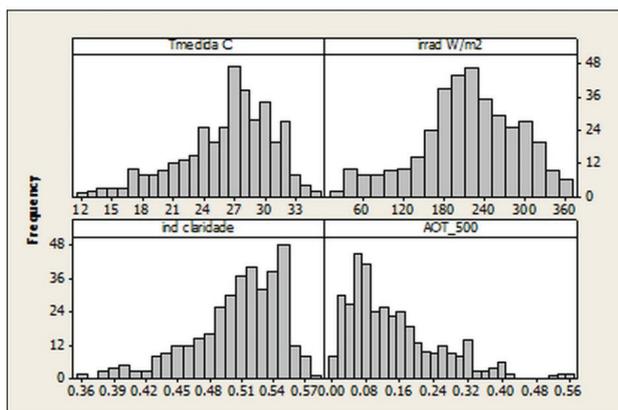


Figura 1. Frequência da distribuição da temperatura da célula (OC), irradiação solar (W/m2), índice de claridade e espessura óptica para o ano de 2013.

A temperatura das células fotovoltaicas é um dos parâmetros mais importantes utilizados na avaliação do desempenho de sistemas fotovoltaicos e de sua potência. A eficiência do módulo fotovoltaico depende em grande medida da temperatura de funcionamento das suas células. Temperaturas de células PV são muito difíceis de medir, uma vez que as células são firmemente encapsuladas, a fim de protegê-las da degradação causada pela exposição contínua ao tempo (TRINURUK et al, 2009).

Tabela 1. Análise descritiva dos valores: Temperatura da célula (oC), irradiação solar (W/m2), velocidade dos ventos(m/s), índice de claridade e espessura óptica (nm) e dias medidos.

	Tmedida C	irrad W/m2	veloc(m/s)	ind claridade	AOT_500
Media	26,2318	214,113	3,01616	0,50589	0,139288
D.P	4,58568	73,962	1,24748	0,0430511	0,110058
CV	17,4814	34,5434	41,3597	8,50996	79,0146
minimo	11,82	14,02	0	0,36	0
maximo	35,35	361,46	7,6	0,58	0,56
N	365	365	365	365	365

Resultados das análises de regressão

Neste estudo, a precisão do modelo foi determinada usando os dados medidos em Campo Grande/MS, no período entre janeiro e dezembro de 2013. Usando os dados obtidos, as constantes de regressão a, b, c e d foram determinadas. As constantes de regressão a, b, c e d foram obtidas utilizando ferramentas de ajuste de curvas proporcionadas pelo software MATLAB. A previsão da temperatura da célula PV foi desenvolvida utilizando dados experimentais obtidos durante o período de análise da área de estudo com base no modelo de previsão de temperatura descrito MLR e PCR.

As Figuras 2 e 3 apresentam uma Modelagem da temperatura calculada em função da irradiação, índice de claridade e aerossóis por análise de regressão múltipla, e uma Modelagem da temperatura calculada em função da irradiação, índice de claridade e aerossóis por análise de componentes principais.

De acordo com a análise estatística (Tabela 2) e resultados do teste estatístico, pode ser visto que os valores estimados da temperatura da célula PV utilizando o modelo estão de acordo com os valores medidos. A figura 3 mostra os valores estimados da temperatura da célula PV usados durante os 65 últimos dias do ano de 2013. As temperaturas atingiram máximas diárias em torno de 30 °C e as baixas temperaturas médias ocorreram em torno de 10 °C, considerando-se todo o período do estudo. Ao longo desse período, a duração do dia variou tipicamente das 7 horas às 18 horas com intensidade de luz. Em geral o céu ficou claro ou não nublado, com pouca variação nesse período.

Os valores da temperatura das células PV calculados e medidos mostram que eles covariam de forma linear, com um coeficiente de correlação de mais de 87%, como é mostrado na figura 2 a e b. Pode ser visto a partir das figuras 2 a e b e 3, e da Tabela 1, que as temperaturas das células PV estimadas mostram uma boa correlação com os dados medidos. Os erros percentuais são muito pequenos, pois nesta análise foram utilizados 365 dados de temperatura das células PV coletadas. Os resultados estatísticos acima mostram que o "modelo" pode ser utilizado para prever a temperatura da célula fotovoltaica com coeficiente de correlação de aproximadamente 88% e erro de 5,25 % para o MRL e de 4,53% para PCR. Com este novo modelo, pode-se estimar com precisão qual a temperatura da célula PV para o estado de Mato Grosso do Sul.

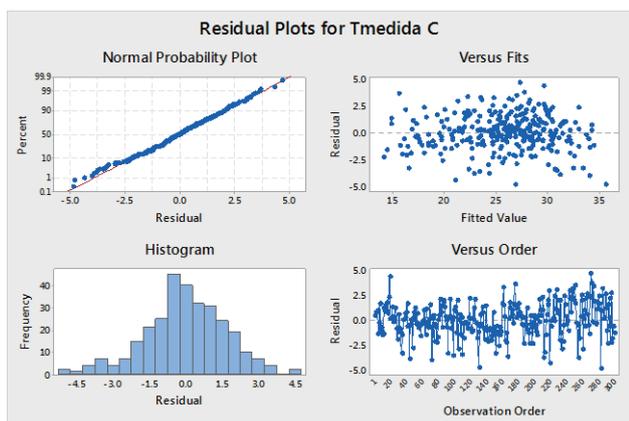


Figura 2. Modelagem da temperatura calculada em função da irradiância, índice de claridade e aerossóis por análise de regressão múltipla.

Tabela 2. Análise de estatística dos valores pelos Modelo de regressão linear (MRL) e Análise dos componentes principais (ACP).

	Tmedida C	irrad W/m2	veloc (m/s)	ind claridade	AOT_500
Media	26,2318	214,113	3,01616	0,50589	0,139288
D.P	4,58568	73,962	1,24748	0,0430511	0,110058
CV	17,4814	34,5434	41,3597	8,50996	79,0146
minimo	11,82	14,02	0	0,36	0
maximo	35,35	361,46	7,6	0,58	0,56
N	365	365	365	365	365

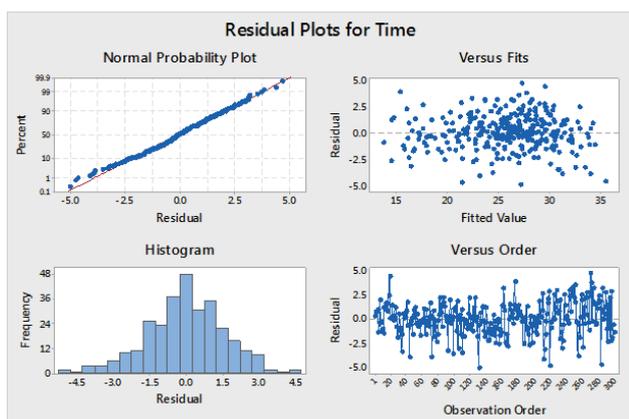


Figura 3. Modelagem da temperatura calculada em função da irradiância, índice de claridade e aerossóis por análise de componentes principais.

Para avaliar o ajuste do modelo deve-se realizar uma análise dos resíduos. Essa análise pode ser feita através do gráfico das variâncias residuais de cada observação em relação aos valores ajustados pelo modelo. Os pontos deste gráfico devem ser próximos, indicando que os valores ajustados estão

perto de valores medidos (SOUZA et al, 2013; DE SOUZA et al., 2015). O modelo definiu o gráfico com os pontos mais próximos a zero no intervalo entre -5,0 a +5,0 (Figura 4).

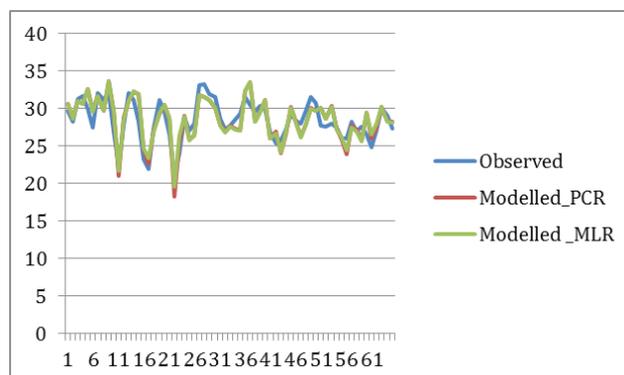


Figura 4. Os resultados da modelização por PCR e MLR, para o período de validação (últimos 65 dias).

Muzathik (2014) estudou a temperatura das células a partir da temperatura ambiente, irradiância e velocidade dos ventos e encontrou que o modelo tende a dar melhor resultados para a temperatura das células. A partir dos resultados das temperaturas preditas conclui-se que os dados mostraram boa correlação com os valores medidos. Os aerossóis possuem características dadas pela atividade antropogênica nos grandes centros populacionais, já os aerossóis rurais têm partículas originadas a partir da atividade orgânica vegetal ou mesmo da queima de biomassa. Na troposfera as partículas de aerossol apresentam vida média curta, normalmente da ordem de dias e semanas, portanto sua distribuição espacial é altamente não-homogênea, sendo correlacionada com suas fontes de emissão.

Os aerossóis têm grande influência no clima, uma vez que eles aumentam a quantidade de radiação refletida para o espaço (efeito albedo), ao mesmo tempo em que, como núcleos formadores de gotículas de água, levam à formação de nuvens que ajudam a concentrar a radiação infravermelha na troposfera (efeito estufa). Também há interação entre aerossóis de pequeno diâmetro com a radiação solar na região espectral do visível e infravermelho próximo. O tamanho destas partículas menores apresenta a mesma ordem que o comprimento de onda da radiação incidente, provocando assim o espalhamento da radiação solar. As partículas maiores possuem um tempo de residência muito baixo na atmosfera, isso faz com que partículas muito grandes (diâmetro > 15 µm) apresentem baixas concentrações na atmosfera. Portanto, devido a esses motivos, a interação de par-

tículas muito grande com a radiação solar é menor quando comparada com as de pequeno tamanho. Entretanto, existem alguns casos especiais em que os efeitos de espalhamento da radiação solar devido a estas partículas de aerossóis de grande diâmetro podem ser acentuados. Como exemplo, tem-se a ocorrência das tempestades de poeira e a queima de biomassa (bastante frequente no centro-oeste brasileiro e região amazônica).

O aumento da concentração de partículas de aerossóis tem efeito fundamental no balanço radiativo terrestre (YAMASOE et al., 2000; 2000; SCHAFFER et al., 2002). Os aerossóis e as nuvens são componentes básicos no balanço energético terrestre, embora seu papel ainda esteja longe de ser compreendido e completamente quantificado. O chamado efeito direto dos aerossóis no clima consiste nos mecanismos que afetam diretamente o fluxo de radiação solar na superfície, podendo levar tanto ao aquecimento quanto ao resfriamento da superfície, dependendo das propriedades intrínsecas das partículas de aerossóis e da refletividade da superfície. O que ocorre é uma alteração no fluxo de energia solar, afetando o perfil de temperatura da atmosfera.

As principais fontes de partículas de aerossóis são: poeira do solo, sulfato (proveniente da oxidação do SO₂), emissões de queimadas de florestas, dentre outros. Os aerossóis troposféricos afetam diretamente o balanço radiativo (absorção e espalhamento de radiação) e/ou indiretamente (influenciando nas propriedades radiativas de nuvens). As nuvens cobrem aproximadamente 60% da superfície terrestre e atuam no ciclo energético através de duas maneiras: as nuvens mais baixas e espessas refletem radiação solar de volta ao espaço e as nuvens mais altas e finas transmitem a radiação solar e ao mesmo tempo bloqueiam a passagem de radiação infravermelha emitida pela Terra.

A maior fonte de aerossóis para a atmosfera na América do Sul são as emissões por queimadas de florestas e cerrados, que ocorrem principalmente na estação seca na região centro oeste. As florestas e os cerrados brasileiros são regiões onde historicamente ocorrem queima de biomassa em função do processo natural do uso do solo pelos agricultores e do uso da lenha como combustível, mas o número de queimadas tem aumentado significativamente nos últimos anos. Observando-se a variação sazonal da concentração de ozônio no ano, em Campo Grande, Mato Grosso do Sul, nota-se que este foi significativamente mais alto durante os meses de agosto e setembro, final do período seco.

As maiores concentrações ocorrem coincidentes com os meses onde a queima de biomassa é mais intensa, associada aos baixos índices pluviométricos. No entanto, o mesmo padrão é observado para a radiação solar global, extraterrestre e índice de ultravioleta e índice de limpidez. Há uma diferença significativa das concentrações de ozônio entre os meses de seca, ou chuvoso. Apesar dos eventos de chuva ser mais efetivos na remoção do particulado, esse comportamento não é observado em Campo Grande estatisticamente entre o índice de limpidez e a concentração de ozônio.

Com variação do índice de limpidez ao longo de todo o período de estudo, de janeiro a dezembro de 2013, foi possível observar o comportamento regular da radiação extraterrestre, através do valor mínimo em junho e máximos nos extremos. Já a radiação global, devido à atenuação sofrida pela presença de nuvens e outros, a curva é irregular, embora seu contorno seja semelhante ao da radiação extraterrestre. O índice de limpidez atmosférico variou de 0,36 a 0,58 com uma média de 0,51.

A distribuição de frequências evidencia a maior ocorrência de valores do índice de limpidez entre 0,36 e 0,58. De acordo com Kudish & Ianetz (1992), índice de limpidez (Kt) acima de 0,60 pode ser representativo de dias claros. Isto significa que, para a cidade estudada – Campo Grande, os dias apresentaram valores de kt abaixo de 0,60. Dias completamente nublados, algumas vezes com chuvas, são caracterizados por índice de limpidez pequeno, entre 0,01 e 0,30.

CONCLUSÃO

O desvio total percentual da temperatura esperada é menor do que 5,25 % para o MRL e de 4,53% para PCR neste estudo. Portanto, pode se concluir que a precisão das temperaturas previstas é adequada para aplicações de energia solar renovável e pode ser usada na área de estudo e em áreas tropicais com condições climáticas similares, onde as variáveis se mantenham relativamente constante ao longo do dia.

Portanto, com base nos resultados estatísticos um novo modelo linear simples é recomendado para estimar as temperaturas das células PV da área de investigação e em outros lugares com áreas semelhantes e condições climáticas equivalentes. O presente trabalho irá ajudar a avançar o estado atual de conhecimento de energia solar fotovoltaica renovável, principalmente onde a estimativa da temperatura das células PV tem aplicações imediatas e relevantes.

Os resultados apresentados demonstram que a modelagem climática é uma ferramenta valiosa para investigar as futuras mudanças na produtividade PVE. Na verdade, a produtividade PVE mostra sensibilidade para a simulação de diferentes cenários futuros, e uma relação coerente com as modificações futuras projetadas na dinâmica do clima. Portanto, embora a flexibilidade do mercado e do desenvolvimento tecnológico seja susceptível de superar qualquer potencial de risco e benefício proveniente de mudanças impulsionado o clima na produtividade PVE no horizonte de tempo analisado no presente estudo, este documento incentiva um uso mais amplo de modelos climáticos na avaliação do futuro da disponibilidade de RE.

Além disso, uma melhoria das simulações do clima apresenta específica para aplicações de RE, por exemplo, o cálculo explícito da irradiação difusa em modelos de desempenho fotovoltaica, seria desejável. A importância das opções políticas de qualidade do ar no futuro as alterações climáticas e, especificamente, para o futuro da produtividade PVE também é destaque. A este respeito, a utilização de um modelo de aerossol-clima estado-da-arte pode ser considerada o valor acrescentado do presente estudo.

Com efeito, a inclusão da dinâmica aerossóis em simulações climáticas é fundamental para uma avaliação correta do sinal do clima e a produtividade PVE relacionada, por causa do impacto dos aerossóis sobre a dinâmica atmosféricas e balanço radiativo.

REFERENCIAS

- ALBRECHT, B. A. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. **Science**, 245, 1989, 1227–1230 p.
- ANGSTROEM, A. Atmospheric turbidity, global illumination and planetary albedo of the earth. **Tellus**, 14, 1962, 435–450p.
- ARTAXO, P.; OLIVEIRA, P. H.; LARA, L. L.; PAULI-QUEVIS, T. M.; RIZZO, L. V.; PIRES JUNIOR, C.; PAIXÃO, M. A.; LONGO K. M., DE FREITAS, S.; CORREIA, A. L. Efeitos Climáticos de Partículas de Aerossóis Biogênicos e Emitidos em Queimadas na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3, 2006,168–22p.
- BRASSEUR, G.; PRINN, R. G.; Pszenny, A. A. P. Atmospheric chemistry in a changing world, an integration and synthesis of a decade of tropospheric chemistry research, **Springer**, Berlin, 2003, 125–156p.
- DELUCCHI, M. A.; JACOBSON, M. Z. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: reliability, system and transmission costs, and policies. **Energy Policy**, 39, 2011, 1170–1190p.
- DENHOLM, P.; HAND, M. Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity. **Energy Policy**, 39, 2011, 1817–1830p.
- DE SOUZA, A.; ARISTONE, F.; SABBAAH, I. Modeling the Surface Ozone Concentration in Campo Grande (MS)—Brazil Using Neural Networks, **Natural Science**, 7, 2015,171-178p.
- EUROPEAN CLIMATE FOUNDATION. Roadmap 2050: a practical guide to a prosperous, low-carbon Europe. European Climate Foundation, **The Hague**, Netherlands, 2010.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Special report on renewable energy sources and climate change mitigation, summary for policymakers. **Cambridge University Press**, Cambridge, 2011.
- HANSEN, J; SATO, M; RUEDY. R. Radiative forcing and climate response. **J Geophys Res**, 102, 1997, 6831–6864p.
- HOLBEN, B. N.; ECK, T. F.; SLUTSKER I.; TANRÉ, D.; BUIS; J. P.; SETZER, A.; VERMOTE, E.; REAGAN, J. A.; KAUFMAN, Y. J.; NAKAJIMA, T.; LAVENU, F.; JANKOWIAK, I.; SMIRNOV, A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, **Remote Sensing Environ.** 66, 1998, 1-16p.
- JACOBSON, M. Z.; DELUCCHI, M. A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. **Energy Policy**, 39, 2011, 1154–1169p.
- JACOBSON, M. Z.; ARCHER, C. L. Saturation wind power potential and its implications for wind energy. **Proc Natl Acad Sci**, 109, 2012, 15679–15684p.
- KLOSTER, S.; DENTENER, F.; FEICHTER, J.; RAES, F.; VAN AARDENNE, J.; ROECKNER E. Influence of future air pollution mitigation strategies on total aerosol radiative forcing. **Atmos Chem Phys**, 8, 2008, 6405–6437p.
- KLOSTER, S.; DENTENER, F.; FEICHTER, J.; RAES, F.; LOHMANN, U.; ROECKNER, E. GCM study of future climate response to aerosol pollution Reductions. **Clim Dyn**, 34, 2010, 1177–1194p.
- KUDISH, A. I.; IANETZ, A. Analysis of the solar radiation data for Beer Sheva, Israel, and its environs. **Solar Energy**, v.48, n.2,1992, 97-106p.
- LATORRE MRDO, CARDOSO MRA. Análise de séries temporais em epidemiologia: uma introdução sobre aspectos metodológicos. **Rev. bras. epidemiol.** 2001;4(3):145-152.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. Introduction to linear regression analysis. Third edition, **John Wiley & Sons**, New York, USA. 2001.
- MUZATHIK A. M. Photovoltaic Modules Operating Temperature Estimation Using a Simple Correlation. **International Journal of Energy Engineering**. Aug. 2014, Vol. 4 Iss. 4, p. 151-158.
- PATT, A.; PFENNINGER, S.; LILLIESTAM. J. Vulnerability of solar energy infrastructure and output to climate change. **Clim Change**, 121, 2013, 93–102p.

- PIRES J; MARTINS F; SOUSA S; ALVIM-FERRAZ M; PEREIRA M. Selection and validation of parameters in multiple linear and principal component regressions. **Environmental Modelling & Software**, 23(1), 2008, 50-55p.
- RAES, F.; SEINFELD, J. H. New directions: climate change and air pollution abatement: a bumpy road. **Atmos Environ**, 43, 2009, 5132–5133p.
- RICIERI, R. P. **Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa**. UNESP, Botucatu, 1998. 81 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Energia na Agricultura - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 1998.
- ROECKNER, E; BENGTTSSON, L; FEICHTER, J; LIEVELD, J; RODHE., H. Transient climate change simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM including the tropospheric sulfur cycle. **J Clim**, 12, 1999, 3004–3032p.
- SCHAFER, J. S.; HOLBEN, B. N.; ECK, T. F.; YAMASOE, M. A.; ARTAXO, P. Atmospheric effects on insolation in the Brazilian Amazon: Observed modification of solar radiation by clouds and smoke and derived single scattering albedo of fire aerosols. **Journal of Geophysical Research**, v.107, 2002, n. D20, 8074p.
- SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; DE LUCENA, A. F. P.; BORBA, B. S. M. C.; NOGUEIRA, L. P. P.; FLEMING, F. P. Energy sector vulnerability to climate change: a review. **Energy**, 38, 2012, 1–12p.
- SOUZA, M. P. & ECHER, E. Lei de Beer aplicada na atmosfera terrestre. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. Vol. 23, n.03, 2001, 276-283p.
- SOUZA, A.; PAVÃO, H. G.; OLIVEIRA, A. P. G. Modeling of ozone due to weather conditions. **Revista Brasileira de Climatologia**. Ano 9 – Vol. 12, JAN/JUL 2013, 8-21p.
- SOUZA, A.; ARISTONE, F.; FERRARI, L. F.; REIS, R. R. Modelling of the Photovoltaic Cell Temperature According to the Ambient Temperature, Wind Speed and Solar Irradiance. **Revista Brasileira de Energia**, v. 5, 2016, 504-518p.
- SOUZA, A.; ARISTONE, F. Estudo da Eficiência Energética de Células Fotovoltaicas em Função da Radiação Solar no Centro-oeste Brasileiro. **Interespaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 2, 2017, 115 -128p.
- TRINURUK, P.; SORAPIPATANA, C.; CHENVIDHYA D. Estimating operating cell temperature of BIPV modules in Thailand, **Renewable Energy**, vol. 34, no. 11, 2009, 2515-2523p.
- TWOMEY, S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. **J Atmos Sci**, 34, 1977, 1149–1152p.
- UNECA United Nations. Economic Commission for Africa. Integrating renewable energy and climate change policies: exploring policy options for Africa. Working paper no. 10. **African Climate Policy Centre**; 2011.
- VERMOTE, E. F.; VERMEULEN, V. **Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (Mod09)**. 1999. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf>.
- YAMASOE, M. A.; ARTAXO, P.; MIGUEL, A. H.; ALLEN, A. G. Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of biomass burning in the Amazon Basin: water-soluble species and trace elements. **Atmospheric Environment**, v.34, 2000, 1.641-1.653p.