

Performance de Sistemas Fixos e Rastreadores Solares Correlacionando o Índice de Irradiância Difusa em Diferentes Áreas no Brasil^{*}

Nadine Figueiredo Rezende Braz^{*} Eduardo Verri Liberado^{*}
Flávio Alessandro Serrão Gonçalves^{*}

^{*} Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Sorocaba, SP, (e-mail: nadine.braz@unesp.br, verri.liberado@unesp.br, flavio.as.goncalves@unesp.br).

Abstract: Solar energy is available abundantly in nature, and a substantial drop in the costs related to photovoltaic systems was observed in the last years. Therefore, solar-based systems have assumed a leading position in the search for alternative sources of energy. Although the use of solar tracker in those systems is not essential, it is known that its use can boost the collected energy. To meet this increasing demand, it is necessary to consider the effect of several parameters that can harm the performance of solar trackers, such as different periods of time, geographical and weather conditions. For that reason, this paper aims to compare the performance of fixed photovoltaic systems and tracking systems in twenty cities in different regions in Brazil as well as their efficiency under different levels of diffuse irradiance and spacing among arrays of photovoltaic modules. Simulations were performed and compared for each location. The results show that the correlation between the tracker gain and diffuse index is -0.9063 for a 6 m pitch, -0.9101 for a 7 m pitch and -0.9184 for an 8 m pitch and the change of the pitch from 6 m to 8 m led to an average increase of 4% in the gain obtained. Therefore, it is envisaged the existence of an inverse correlation between the diffuse indexes and tracker gain as well as the influence of the chosen pitch for each location.

Resumo: A energia solar está disponível em abundância na natureza, e uma considerável queda nos custos relacionados aos sistemas fotovoltaicos foi observada nos últimos anos. Portanto, sistemas baseados em energia solar assumiram uma posição de destaque na busca por fontes alternativas de energia. Embora o uso do rastreador solar nestes sistemas não seja essencial, sabe-se que seu uso pode potencializar a energia coletada. Para atender a essa demanda crescente, é necessário considerar o efeito de diversos parâmetros que podem prejudicar o desempenho dos rastreadores solares, como diferentes períodos de tempo, condições geográficas e climáticas. Por essa razão, este trabalho tem como objetivo investigar o desempenho de sistemas fotovoltaicos fixos e sistemas de rastreamento em vinte cidades de diferentes regiões do Brasil, bem como a sua eficiência sob diferentes níveis de irradiância difusa e espaçamentos entre arranjos de módulos fotovoltaicos. Simulações foram realizadas e comparadas para cada local. Os resultados mostraram que a correlação entre o ganho do rastreador e o índice difuso é de -0.9063 para um espaçamento de 6 m, -0.9101 para um espaçamento de 7 m e -0.9184 para um espaçamento de 8 m, e a mudança do espaçamento de 6 m para 8 m levou a um aumento médio de 4% no ganho obtido. Portanto, é prevista a existência de uma correlação inversa entre os índices difusos e o ganho do rastreador, bem como a influência do espaçamento escolhido para cada local.

Keywords: Photovoltaic System; Solar Energy; Solar Trackers; Diffuse Irradiance; Energy Production Estimation.

Palavras-chaves: Sistema Fotovoltaico; Energia Solar; Rastreadores Solares; Irradiância Difusa; Estimativa de Produção de Energia.

1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente conscientização em relação à preservação do meio ambiente, a principal prioridade na produção de energia elétrica consiste na redução do consumo de combustíveis fósseis, ao mesmo tempo em que sejam mantidos os níveis de produção de energia. Para isso, o investimento em sistemas provenientes de fontes renováveis tem ganhado cada vez mais importância (Allamehzadeh, 2017). Estes sistemas não só produzem energia limpa, como também contribuem para o desenvolvimento econômico do país através da criação de empregos.

Segundo relatório disponibilizado pela IRENA (*International Renewable Energy Agency*) (IRENA, 2022), dentre as diferentes fontes de energias renováveis, a energia solar apresentou o maior crescimento global da capacidade adicionada em 2021, conforme mostrado na Figura 1.

Apenas uma fração da irradiância incidente no topo da atmosfera atinge a superfície da Terra. Isso ocorre pois ao se propagar na atmosfera, as ondas eletromagnéticas deparam-se com partículas que atuam como espalhadoras e absorvedoras da radiação solar. Desta forma, a irradiância global horizontal é composta pela irradiância direta normal (DNI), parcela que não sofre interferência do espalhamento formando feixes de raios solares praticamente paralelos entre si, e pela irradiância difusa horizontal (DHI), parcela da irradiância que atinge a superfície de forma indireta (Coelho, 2016). A estimativa da irradiância incidente em uma superfície inclinada é essencial para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, uma vez que esses sistemas são, normalmente, instalados no plano inclinado para otimizar a geração de energia e evitar o acúmulo de sujeira (Oliveira, 2017).

Conforme mostrado na eq.(1), a irradiância total incidente no plano inclinado E_{gt} é composta por três componentes, sendo a irradiância direta no plano inclinado E_b , a irradiância refletida no solo E_g e a irradiância difusa no céu E_d (Padovan and Del Col, 2010).

$$E_{gt} = E_b + E_g + E_d \quad (1)$$

Normalmente, a medição da irradiância difusa horizontal (DHI) requer equipamentos que aumentam substancialmente os custos de instalação e manutenção, dificultando sua implementação em países em desenvolvimento (Miranda et al., 2021). Para resolver este problema, Elieser *et al.*, dentre outros pesquisadores, têm usado métodos como técnicas de modelagem ou métodos de estimativa por satélite que permitem prever a irradiância difusa horizontal a partir da irradiância horizontal global.

A relação entre a irradiância difusa e a irradiância global é representada pelo índice difuso, k_d , o qual descreve quanto da irradiância global é medida como irradiância difusa. Dessa forma, a situação de céu nublado resultaria em um índice difuso alto, próximo a 1. Em contraste, uma situação sem nuvens resultaria em quase nenhuma irradiância difusa e, portanto, um índice difuso baixo, próximo de 0 (Hansen, 2020).

* Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001 pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

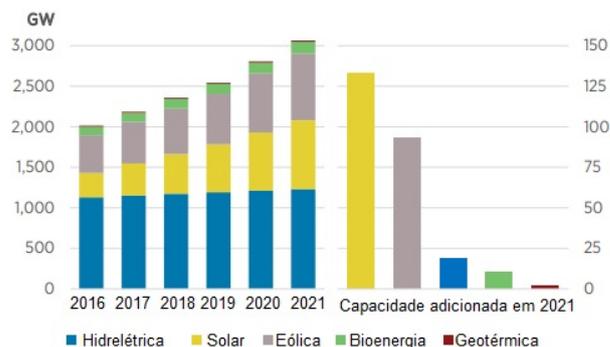


Figura 1. Crescimento da capacidade global de energia renovável nos últimos anos. Fonte: IRENA (2022).

Considerando o modelo de movimentação solar, sistemas fixos apresentam menor eficiência de conversão de energia devido ao desalinhamento com o Sol durante algumas horas do dia e/ou meses do ano (Trevelin, 2014). Assim, uma maneira de aumentar a eficiência em sistemas fotovoltaicos consiste no emprego de rastreadores solares, cujo principal objetivo consiste em orientar os painéis fotovoltaicos ao longo do dia, de modo que sua posição seja a mais perpendicular possível à radiação solar (Allamehzadeh, 2017).

Os rastreadores solares podem ser classificados de acordo com seu grau de liberdade e sua tecnologia de rastreamento. Quanto ao grau de liberdade, os rastreadores solares podem ser de eixo único, ou seja, quando possuem somente um eixo de rotação, ou de eixo duplo, quando possuem dois eixos de rotação. Quanto à tecnologia de rastreamento, os rastreadores solares podem ser passivos ou ativos (Nsengiyumva et al., 2018). Rastreadores solares passivos possuem um funcionamento mais simples em relação aos ativos. Rastreadores ativos normalmente utilizam motores e mecanismos de engrenagem, e esses motores são alimentados por um sinal de controle, que proporciona a magnitude e direção para que o rastreamento seja realizado. Mesmo consumindo energia, são mais empregados devido a sua maior acurácia em relação aos passivos (Sumathi et al., 2017). Em sua tecnologia de rastreamento, rastreadores ativos podem contar com o emprego de microprocessadores e sensores eletro-ópticos, algoritmos baseados em data e hora, ou uma combinação de ambos.

Em comparação com sistemas fixos, rastreadores de eixo único podem aumentar a geração de energia em cerca de 20% (Rosma et al., 2018), enquanto rastreadores de eixo duplo podem alcançar valores de até 40% (Said et al., 2019). O ganho de energia é altamente dependente da localização geográfica, bem como da tecnologia usada e das condições climáticas do local (Batayneh et al., 2019). Dependendo dessas variáveis, os resultados provenientes do emprego de um rastreador solar de eixo duplo podem ser próximos aos de um rastreador de eixo único, evidenciando que, em algumas condições, tais sistemas não apresentam diferenças significativas de geração de energia (Fahad et al., 2019).

Em dias de céu claro, a componente de irradiância direta pode chegar a 85% da irradiância total e os 15% restantes representam a irradiância difusa. Contudo, em

dias nublados, quase toda a irradiância solar é difusa e o rastreamento solar pode não ser viável para maximizar a captura de energia, devido à energia gasta para encontrar a posição do sol (Melo et al., 2017). Independente das condições de nebulosidade, rastreadores solares devem ser capazes de rastrear o ponto de máxima radiação. Quando a quantidade de nuvens em toda a esfera celestrial é considerável, o ponto de máxima radiação se encontra na área menos densa. Quando a quantidade de nuvens é uniforme, o melhor desempenho ocorre com os painéis posicionados horizontalmente pois pode não ser viável mover o rastreador devido à quantidade de energia exigida. Contudo, em condições parciais de nebulosidade, as melhores práticas recomendam o deslocamento de alguns graus da direção perpendicular dos raios solares (Melo et al., 2017).

Um estudo conduzido em Bangladesh comparou o desempenho de um sistema fixo, um sistema com rastreador de eixo único e um sistema com rastreador de eixo duplo, de forma a constatar que o sistema de eixo duplo obteve um ganho de 3,96% em relação ao de eixo único, e, quando considerados os dias nublados, esse ganho caiu para 3,44%. Considerando que os custos de manutenção e operação para rastreadores solares de eixo duplo normalmente são maiores, o estudo constatou que para essa localidade é mais viável a implementação do rastreador de eixo único (Fahad et al., 2019).

Kuttybay et al. (2019) propôs um sistema de controle inteligente para um rastreador solar localizado no Cazaquistão, no qual o método proposto de detecção da presença de nuvens permite que o sistema se adapte a várias condições climáticas em tempo real, alterando o ângulo do painel solar quando necessário. O estudo concluiu que para dias nublados a energia obtida proveniente do sistema de controle é 18% maior quando comparada à energia obtida de um rastreador de eixo duplo sem o sistema de controle.

Sinjari and Shareef (2016) utilizaram um CLP (Controlador Lógico Programável) Siemens[®] S7-1214 e 4 LDR's para controlar um rastreador solar de eixo duplo em Erbil, Iraque. Para condições de tempo nublado ou módulos submetidos à sujeira, o sistema de rastreamento não realizava o reposicionamento porque a diferença de tensão entre os LDR's leste e oeste e norte e sul era muito pequena (menos de 100 mV).

Em Mossoró - RN, Brasil, Vieira et al. (2016) comparou o desempenho de um sistema fixo e um sistema com um rastreador solar de eixo único ativo controlado por sensores. Concluiu que o desempenho do rastreador solar em relação ao sistema fixo foi severamente impactado em dias nublados, quando a irradiação difusa incidente é maior.

Zhen et al. (2017) realizou simulações em localidades com diferentes níveis de irradiância direta e difusa e com diferentes espaçamentos entre fileiras (*arrays*) de módulos. Concluiu que para áreas onde os níveis de irradiância direta são maiores, é conveniente utilizar maiores espaçamentos entre as fileiras, enquanto para áreas em que há maiores níveis de irradiância difusa é possível verificar que o desempenho do sistema não apresenta ganho relevante à medida que o espaçamento aumenta.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é comparar o desempenho de sistemas fixos e sistemas com rastreadores solares de eixo único considerando diferentes níveis de irradiância difusa, de forma a estudar a correlação entre irradiância difusa e os ganhos de geração de energia obtidos por rastreadores solares.

Este documento é organizado da seguinte forma: Seção 2 apresenta a metodologia, a seção 3 apresenta os resultados obtidos e a seção 4 é composta pelas conclusões.

2. METODOLOGIA

Para realizar a avaliação do desempenho de sistemas fixos e sistemas com rastreadores solares, foram feitas simulações de uma usina com capacidade instalada de 970,2 kWp em vinte cidades do Brasil, listadas com suas respectivas coordenadas geográficas na Tabela 1. As cidades foram escolhidas de forma a contemplar localidades com diferentes níveis de irradiância.

Tabela 1. Cidades utilizadas nas simulações e suas coordenadas geográficas.

Cidade - Estado	Latitude (° S)	Longitude (° O)
João Pessoa - PB	7,1	34,8
Tibau do Sul - RN	4,8	37,2
Bom Jesus da Lapa - BA	13,2	43,4
Fortaleza - CE	3,7	38,5
Galinhos - RN	5,1	36,2
Pureza - RN	5,4	35,7
Salvador - BA	13,0	38,5
Montes Claros - MG	16,7	43,8
Manaus - AM	3,1	60,0
Andradas - MG	22,0	46,5
São João da Boa Vista - SP	21,9	46,7
Vila Velha - ES	20,3	40,3
Santa Maria - RS	29,6	53,8
Niterói - RJ	22,8	43,1
Franca - SP	20,5	47,3
Tramandaí - RS	29,9	50,1
Teresópolis - RJ	22,4	42,9
Ubatuba - SP	23,4	45,1
Florianópolis - SC	27,6	48,5
Santos - SP	23,9	46,3

O *software* utilizado para a realização das simulações foi o PVSyst[®] versão 7.2, a base de dados solarimétricos utilizada foi a Meteonorm 8.0, e o modelo de transposição utilizado foi o modelo de Perez et al. (1990). Em todas as cidades, a usina foi simulada considerando dois cenários. No primeiro cenário, a estrutura da usina é fixa inclinada de acordo com o ângulo ótimo indicado pelo *software* utilizado nas simulações, no segundo cenário, a estrutura da usina é composta por rastreadores solares de eixo único horizontal. Em ambos os cenários, foram feitas simulações considerando 6 m, 7 m e 8 m de espaçamento entre as fileiras. Em todas as simulações, foram utilizados 3.234 módulos (154 *strings*, cada qual com 21 módulos em série) e 8 inversores de mesma potência. As especificações dos equipamentos utilizados nas simulações são apresentadas na Tabela 2.

Dessa forma, o índice difuso k_d (%) foi calculado para cada uma das vinte localidades, conforme a eq.(2), em que DHI equivale à irradiância difusa horizontal e GHI equivale à irradiância global horizontal.

Tabela 2. Especificações dos Equipamentos Utilizados nas Simulações.

Equip.	Marca	Modelo	Pot.
Painel FV	Canadian Solar	CS3K-300MS	300 Wp
Inversor	Fronius Int.	AGILO 100.0-3 Out.	100 kW

$$k_d = \frac{DHI}{GHI} \times 100 \quad (2)$$

Após o levantamento do índice difuso de cada região, foram calculados os coeficientes de correlação. O coeficiente de correlação de Pearson ou r de Pearson requer uma magnitude e uma direção positiva ou negativa. Quanto mais o coeficiente se aproxima de ± 1 , independente da direção, mais forte é a relação linear entre as duas variáveis. Quanto mais o coeficiente se aproxima de 0, menos forte é a relação linear entre as duas variáveis, indicando que não há relação entre elas (Taylor, 1990). O coeficiente de correlação de Spearman avalia a relação monotônica entre duas variáveis contínuas ou ordinais. Assim, as variáveis tendem a mudar juntas mas não necessariamente a uma taxa constante, e por este motivo foi o método empregado neste trabalho, com o objetivo de especificar o coeficiente de correlação entre os índices difusos e os ganhos obtidos para cada valor de espaçamento entre fileiras. Os coeficientes podem ser calculados conforme mostrado na eq.(3), sendo x e y os vetores analisados, e N o número de pares (de Winter et al., 2016).

$$r_s = 1 - 6 \frac{\sum_{i=1}^N (x_{i,r} - y_{i,r})^2}{N(N^2 - 1)} \quad (3)$$

Um *script* foi desenvolvido na plataforma Python para a determinação dos coeficientes baseado no método de cálculo supracitado.

3. RESULTADOS

A apresentação dos resultados é organizada em duas seções. Primeiro, a seção 3.1 apresenta resultados considerando os níveis de irradiância globais e difusas para cada região analisada, bem como os ganhos obtidos com o emprego de rastreador solar de eixo único tomando diferentes espaçamentos entre as fileiras. Na sequência, a seção 3.2 apresenta a determinação dos índices difusos para cada região analisada, e, posteriormente define os fatores de correlação entre o índice difuso e o ganho obtido com o rastreador solar para cada espaçamento entre fileiras adotado.

3.1 Análise dos níveis de irradiância e ganhos obtidos com o emprego de rastreador

As irradiâncias globais e difusas anuais médias de cada cidade, de acordo com a base de dados Meteororm 8.0, são mostradas na Figura 2. Os valores, organizados de forma decrescente, evidenciam que as cidades localizadas na Região Nordeste são as que possuem maiores níveis de irradiância global em comparação com cidades localizadas nas demais regiões.

As simulações no *software* PVSyst[®] foram feitas para os dois cenários descritos considerando espaçamentos entre as fileiras de módulos de 6 m, 7 m e 8 m.

A Tabela 3 mostra o ganho de geração de energia obtido pelo sistema com rastreador solar de um eixo em comparação com o sistema fixo para cada valor de espaçamento adotado.

Tabela 3. Comparação dos Resultados Obtidos.

Localidade	Ganho (%) - 6m		Ganho (%) - 7m		Ganho (%) - 8m		Δ Ganho(%)
	6m	7m	7m	8m	8m		
João Pessoa - PB	16,3	18,9	20,8	4,5			
Tibau do Sul - RN	15,8	18,5	20,1	4,3			
Bom Jesus da Lapa - BA	14,8	17,3	19,2	4,4			
Fortaleza - CE	15,6	18,3	19,9	4,3			
Galinhos - RN	15,3	17,9	19,5	4,2			
Pureza - RN	15,0	17,6	19,1	4,1			
Salvador - BA	13,3	15,8	17,3	4,0			
Montes Claros - MG	12,1	14,7	16,5	4,4			
Manaus - AM	13,0	15,1	16,7	3,7			
Andradas - MG	11,0	13,4	15,2	4,2			
São João da Boa Vista - SP	10,2	12,5	14,4	4,2			
Vila Velha - ES	10,3	12,7	14,6	4,3			
Santa Maria - RS	11,2	13,6	15,4	4,2			
Niterói - RJ	9,7	11,9	13,5	3,8			
Franca - SP	9,5	12,1	13,9	4,4			
Tramandaí - RS	11,4	13,8	15,5	4,1			
Teresópolis - RJ	9,8	12,0	13,6	3,8			
Ubatuba - SP	8,3	10,2	11,8	3,5			
Florianópolis - SC	9,2	11,2	12,7	3,5			
Santos - SP	8,6	10,6	12,0	3,4			

Constata-se que, com um espaçamento de 6 m entre as fileiras de módulos, o sistema com rastreador solar em João Pessoa - PB pode gerar até 16,3% a mais que o sistema fixo, seguido por Tibau do Sul - RN (15,8%) e Fortaleza (15,6%). Com o aumento do espaçamento para 8 m, o sistema com rastreador solar pode gerar cerca de 20% a mais que o sistema fixo nessas localidades, evidenciando ganhos de mais de 4% apenas com o aumento da distância entre as fileiras.

3.2 Índice difuso e Fator de Correlação

O índice difuso foi calculado para cada localidade e apresentado na Tabela 4 em ordem crescente. Constata-se que as cidades que possuem os índices difusos mais altos são: Santos - SP (56%), Ubatuba - SP (55%) e Florianópolis - SC (52%). Para essas localidades, verifica-se que o aumento do espaçamento entre fileiras contribui menos para o ganho de geração (em média 3.4%) quando comparado a localidades onde o índice difuso é menor.

Posteriormente, os coeficientes de correlação entre os índices difusos e os ganhos obtidos foram calculados, e são apresentados na Tabela 5.

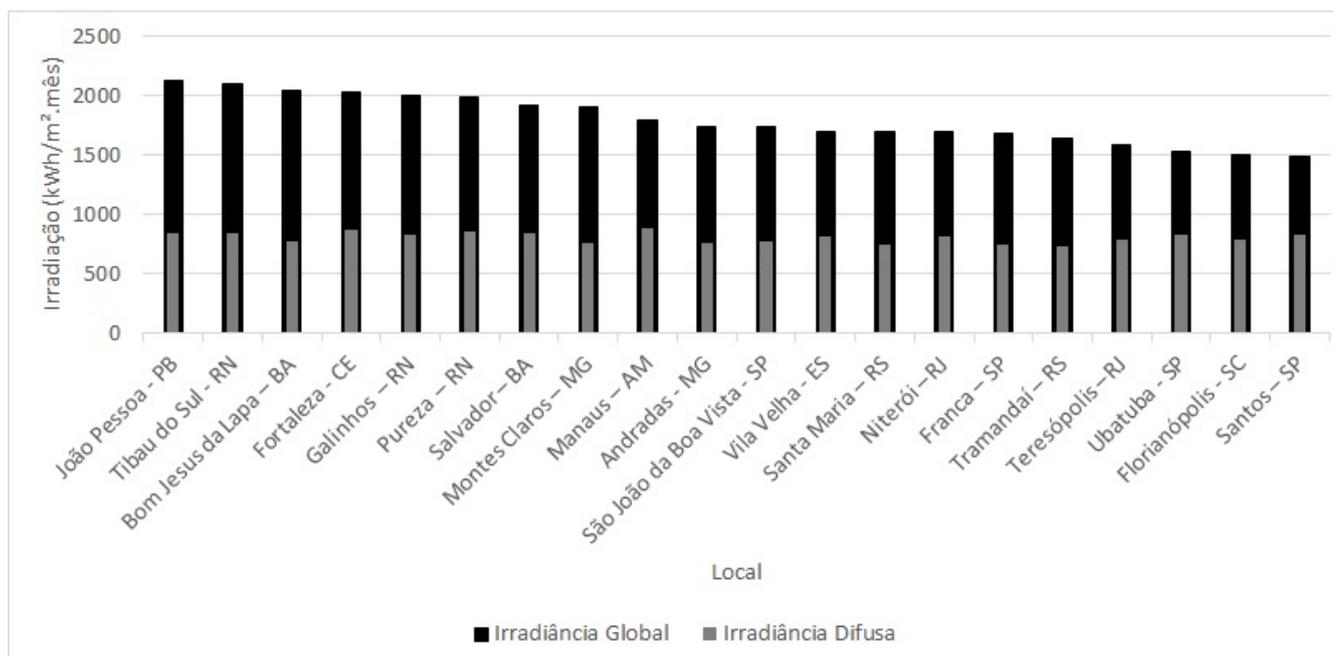


Figura 2. Irradiância global e direta em cada localidade.

Tabela 4. Índice Difuso.

Localidade	Índice Difuso (%)
Bom Jesus da Lapa - BA	38
João Pessoa - PB	40
Montes Claros - MG	40
Tibau do Sul - RN	40
Galinhos - RN	42
Fortaleza - CE	42
Pureza - RN	43
Salvador - BA	43
Andradadas - MG	43
Santa Maria -RS	44
Franca -SP	45
São João da Boa Vista - SP	45
Tramandaí - RS	45
Vila Velha - ES	48
Niterói - RJ	48
Manaus - AM	49
Teresópolis - RJ	50
Florianópolis - SC	52
Ubatuba - SP	55
Santos - SP	56

Tabela 5. Fatores de Correlação - Índice difuso x Ganho obtido.

Espaçamento 6 m	Espaçamento 7 m	Espaçamento 8 m
-0.9063	-0.9101	-0.9184

4. CONCLUSÃO

Esse trabalho teve por objetivo investigar o desempenho de sistemas fixos e sistemas com rastreadores solares de eixo único horizontal instalados sob diferentes níveis de irradiância difusa em diferentes localidades brasileiras. Através dos fatores de correlação obtidos, foi possível constatar que há uma correlação inversa (valores próximos a -1) entre os índices difusos e os ganhos obtidos com diferentes espaçamentos entre as fileiras de módulos. Isso indica que

quanto maiores os níveis de irradiância difusa na localidade, menor é a eficiência obtida com a implementação de um rastreador solar. Como exemplo, verifica-se que as localidades de Santos e Ubatuba são as que apresentam os maiores índices difusos, 56% e 55%, respectivamente, e ao mesmo tempo são as localidades que possuem os resultados de ganhos mais baixos, independentemente do espaçamento utilizado entre fileiras.

Por outro lado, verificou-se que para as localidades de menor índice difuso, como Bom Jesus da Lapa, João Pessoa, Montes Claros, Tibau do Sul, Galinhos e Fortaleza, a variação do espaçamento entre as fileiras de módulos de 6 m para 8 m aumenta em mais de 4% a eficiência do emprego do rastreador solar em relação ao sistema fixo, evidenciando a viabilidade no aumento do espaçamento entre fileiras para as localidades em que o índice difuso é menor. Em contrapartida, esse valor é inferior a 4% para as localidades onde o índice difuso é mais alto, como Teresópolis, Florianópolis, Ubatuba e Santos.

Finalmente, o trabalho evidencia a importância de se avaliar a irradiância difusa, que pode impactar a viabilidade da implementação de rastreadores solares. Como sugestão para trabalhos futuros, estudos da influência da irradiância difusa em outras tecnologias de rastreadores solares ou mesmo no emprego de módulos bifaciais podem ser analisados.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001, dos processos nº 2018/24331-0 e nº 2016/08645-9, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), e, do processo nº 313710/2019-8, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- Allamehzadeh, H. (2017). Solar energy overview and maximizing power output of a solar array using sun trackers. *2016 IEEE Conference on Technologies for Sustainability, SusTech 2016*, 14–19. doi:10.1109/SusTech.2016.7897136.
- Batayneh, W., Bataineh, A., Soliman, I., and Hafees, S.A. (2019). Investigation of a single-axis discrete solar tracking system for reduced actuators and maximum energy collection. *Automation in Construction*, 98, 102–109. doi:https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.011.
- Coelho, L.D.N. (2016). *Modelos de estimativa das componentes de radiação solar a partir de dados meteorológicos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Brasília, Brasília.
- de Winter, J.C., Gosling, S.D., and Potter, J. (2016). Comparing the pearson and spearman correlation coefficients across distributions and sample sizes: A tutorial using simulations and empirical data. *Psychological methods*, 21(3), 273.
- Fahad, H.M., Islam, A., Islam, M., Hasan, M.F., Brishty, W.F., and Rahman, M.M. (2019). Comparative Analysis of Dual and Single Axis Solar Tracking System Considering Cloud Cover. In *2019 International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE)*, 1–5.
- Fahad, H.M., Islam, A., Islam, M., Hasan, M.F., Brishty, W.F., and Rahman, M.M. (2019). Comparative analysis of dual and single axis solar tracking system considering cloud cover. In *2019 International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE)*, 1–5. IEEE.
- Hansen, J.H. (2020). *Two-axis tracking solar irradiance measurements at Tromsø*. Dissertação de mestrado, UiT The Arctic University of Norway.
- IRENA (2022). Renewable capacity highlights. Technical report, International Renewable Energy Agency.
- Kuttybay, N., Mekhilef, S., Saymbetov, A., Nurgaliyev, M., Meirrkhanov, A., Dosymbetova, G., and Kopzhan, Z. (2019). An automated intelligent solar tracking control system with adaptive algorithm for different weather conditions. In *2019 IEEE international conference on automatic control and intelligent systems (I2CACIS)*, 315–319. IEEE.
- Melo, A.G., Oliveira Filho, D., Junior, M.M.O., Zolnier, S., and Ribeiro, A. (2017). Development of a closed and open loop solar tracker technology. *Acta Scientiarum. Technology*, 39(2), 177–183.
- Miranda, E., Fierro, J.F.G., Narváez, G., Giraldo, L.F., and Bressan, M. (2021). Prediction of site-specific solar diffuse horizontal irradiance from two input variables in colombia. *Heliyon*, e08602.
- Nsengiyumva, W., Chen, S.G., Hu, L., and Chen, X. (2018). Recent advancements and challenges in solar tracking systems (sts): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 250–279.
- Oliveira, L.G.M. (2017). *Avaliação De Fatores Que Influenciam Na Estimativa Da Geração E Operação De Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Elétrica*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Padovan, A. and Del Col, D. (2010). Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes. *Solar Energy*, 84(12), 2068–2084. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.09.009.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., and Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271–289. doi:10.1016/0038-092X(90)90055-H.
- Rosma, I.H., Putra, I.M., Sukma, D.Y., Safrianti, E., Zakri, A.A., and Abdulkarim, A. (2018). Analysis of Single Axis Sun Tracker System to Increase Solar Photovoltaic Energy Production in the Tropics. In *2018 2nd International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICon EEI)*, 183–186. doi:10.1109/ICon-EEI.2018.8784311.
- Said, A., Alaoui, S.M., Rouas, Y., Dambrine, G., Menard, E., Boardman, J., and Barhdadi, A. (2019). Innovative low cost cleaning technique for PV modules on solar tracker. *Proceedings of 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2018*, 1–4. doi:10.1109/IRSEC.2018.8702861.
- Sinjari, A.M. and Shareef, S.J.M. (2016). Dual axis solar tracking system using plc. In *1st International Conference on Engineering and Innovative Technology, SU-ICEIT*.
- Sumathi, V., Jayapragash, R., Bakshi, A., and Kumar Akella, P. (2017). Solar tracking methods to maximize PV system output – A review of the methods adopted in recent decade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(February 2016), 130–138. doi:10.1016/j.rser.2017.02.013. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.013>.
- Taylor, R. (1990). Interpretation of the correlation coefficient: a basic review. *Journal of diagnostic medical sonography*, 6(1), 35–39.
- Trevelin, F.C. (2014). Estudo Comparativo Entre Métodos de Rastreamento Solar Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos. Trabalho de graduação, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Vieira, R., Guerra, F., Vale, M., and Araújo, M. (2016). Comparative performance analysis between static solar panels and single-axis tracking system on a hot climate region near to the equator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 672–681.
- Zhen, Z., Zengwei, Z., Li, S., Jun, W., Wuchun, P., Zhikang, L., Lei, W., Wei, C., and Yunhua, S. (2017). The effects of inclined angle modification and diffuse radiation on the sun-tracking photovoltaic system. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(5), 1410–1415.