



RASTREADOR SOLAR NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA EM ARACAJU – SERGIPE: ANÁLISE ENERGÉTICA

Flávio Santiago C. Bispo¹

Pedro Henrique Barzotto Wirti²

Heytell Whitney de Souza Silverio²

Douglas Bressan Riffel²

¹Universidade Federal de Sergipe, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,

²Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Mecânica,

Resumo: O presente artigo pretende auxiliar projetistas no estudo de viabilidade do uso de rastreadores em unidades de geração distribuída fotovoltaica. A presente análise foi realizada com dados de Aracaju, mas a metodologia adotada permite replicar o estudo para outras localidades. A previsão da geração em função do azimute e da inclinação são apresentados utilizando dados horários de irradiação solar e demonstram o quanto de energia pode ser produzido a mais em função do seguimento solar.

Palavras-chave: rastreador solar, viabilidade técnica, geração fotovoltaica

1. INTRODUÇÃO

A utilização de painéis fotovoltaicos para a produção de energia solar tem crescido mundialmente desde os anos 2000. No Brasil, a resolução RN 482/12 e posteriormente a RN 687/15 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamentaram a geração distribuída. Estas resoluções, unidas a isenções fiscais e a entendimentos como o convênio Confaz 16/2015 que isenta de ICMS o consumo de créditos de energia gerados, permitiram a atual expansão da utilização deste tipo de energia – ainda pouco utilizada no país, apesar do grande potencial de geração, principalmente na região nordeste – dentro da matriz elétrica nacional.

O alto custo dos equipamentos muitas vezes torna a energia fotovoltaica pouco atrativa aos consumidores, devido ao longo período necessário para o retorno do investimento e as condições de financiamento. Somado a isto, há pouco conhecimento sobre a influência das inclinações e orientações de uma instalação na quantidade de energia gerada anualmente.

Tendo em vista estas dificuldades, foram realizadas simulações no software SAM (System Advisor Model) para verificar a influência dos ângulos de inclinação e azimute em sistemas fotovoltaicos localizados na cidade de Aracaju, utilizando a metodologia da energia anual normalizada, tal qual proposta por Krezinger & Gasparin (2016). Posteriormente, foram realizadas as mesmas simulações, porém considerando a utilização de rastreadores, obtendo-se um percentual de aumento de geração devido ao rastreamento para cada orientação.

2. TEORIA DA INSOLAÇÃO EM UM PLANO INCLINADO E COM RASTREAMENTO

Como o objetivo é verificar a influência dos ângulos de inclinação e azimute em plano inclinado e com rastreamento para sistemas fotovoltaicos localizados na cidade de Aracaju, faz-se necessário o conhecimento das características da irradiação solar (insolação) incidente sobre a superfície.

Logo, conforme a NBR 10898 (ABNT, 2006), segue que a insolação (H) é a integração, durante um dia, da irradiância solar, (G em Wh/m^2), medida em Joule por metro quadrado (J/m^2). Além da insolação, é definido que a irradiância direta normal, G_{DIRN} , é a densidade de fluxo de energia da radiação solar de raios perpendiculares a uma superfície plana. Já a radiação direta horizontal, G_{DIRH} , difere da G_{DIRN} no que compete a colisão dos raios diretos em uma superfície no plano horizontal (PAULESCU et al., 2013).

Assim, o primeiro cálculo realizado corresponde a obtenção da radiação extraterrestre, G_{ex} . Neste trabalho, tal variável pode ser obtida, de forma simples, como função do dia no ano [1].

$$G_{ex} = G_{sc} \left(1 + 0,33 \cdot \cos \left(\frac{2\pi \cdot n}{365} \right) \right) \quad [1]$$

em que G_{sc} é a constante solar de valor $1367 W/m^2$ (DUFFIE; BECKMAN, 2013) e n é o número do dia do ano, começando de 1 de janeiro até 31 de dezembro. Após a obtenção desse valor, os modelos matemáticos da irradiação solar absorvida por um painel em superfície sob condições de céu limpo para sistemas de plano inclinado e com rastreamento são apresentados.

2.1. Análise de ângulos

Deixe ser um plano P inclinado a um ângulo (tilt) β com relação ao plano horizontal da superfície de latitude φ , conforme representado na Fig. 1. O parâmetro α é o ângulo de altitude aparente do Sol, A_{ZS} é o ângulo de azimute solar de superfície, δ é o ângulo de declinação e o ângulo de incidência do Sol, θ_i , é formado pela componente normal do plano com a componente que define a altitude solar α .

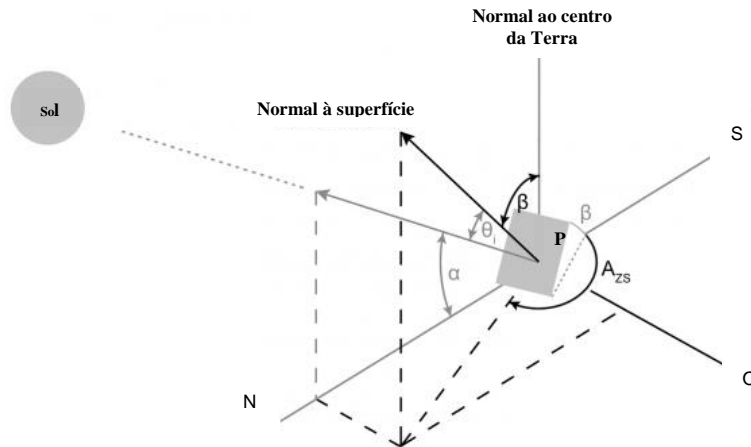


Figura 1. Superfície inclinada que não está virado para o equador (ITACA, 2016).

O ângulo declinação, δ , é calculado conforme o dia no ano [2].

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[2\pi \cdot \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \text{ [rad]} \quad [2]$$

Em seguida, obtêm-se o valor do ângulo de altitude aparente do Sol, α , pela Eq. [3].

$$\alpha = \arcsen(\text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi)) \text{ [rad]} \quad [3]$$

em que ω é o ângulo horário, obtido de forma simplificada como $\omega = 15 \cdot (T - 12) \text{ [rad]}$.

O ângulo de Azimute, A_{ZS} , é dado como em [4],

$$A_{ZS} = \arcsen \left(\frac{\cos(\delta) \text{sen}(\omega)}{\cos(\alpha)} \right) \text{ [rad]} \quad [4]$$

O ângulo de incidência (θ_i) do Sol sobre uma superfície inclinada com um ângulo em relação à horizontal β e com qualquer ângulo de azimute superfície A_{ZS} da Fig. 1 pode ser calculada a partir de simplificações realizadas, tais como na equação [5] para o painel inclinado para a linha do Equador a partir do hemisfério Sul.

$$\cos(\theta_i) = \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\varphi + \beta) + \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi + \beta) \text{ [rad]} \quad [5]$$

2.2. Cálculo de Insolação Com Rastreamento

Os sistemas de rastreamento solar variam de acordo com o movimento que eles desempenham (ALATA; AL-NIMR; QAROUSH, 2005). De forma simples são classificados como rastreadores: (i) de único eixo tipo horizontal ou de único eixo inclinado ao ângulo de latitude, (ii) de dois eixos tipo equatorial com ângulo igual à latitude e (iii) de dois eixos tipo azimute/elevação.

Os rastreadores de dois eixos têm por objetivo zerar os erros dos ângulos de altitude, α , e de Azimute, A_{ZS} . Desta forma, o ângulo de incidência é a componente normal do plano da placa, proporcionando que toda a radiação direta, G_{DIRN} ,



esteja incidindo no painel. Neste trabalho, é adotado o modelo para rastreador de único eixo com inclinação fixa. Esta inclinação fixa provoca uma perda de rastreabilidade do arco correspondente ao ângulo de declinação, embora tenda zerar erro de Azimute, conforme a Eq. [6].

$$G_{RINC} = G_{DIRN} \cdot \cos(\delta) \quad [6]$$

em que G_{RINC} é a irradiância que incide perpendicularmente no plano.

2.3. Cálculo de Insolação Sem Rastreamento (Plano Horizontal e Inclinado)

Para obtenção da irradiância através do sistema sem rastreamento (de plano inclinado), G_{SRI} , assume-se que o referido painel está instalado em superfície, perpendicular ao eixo de longitude e faceando o Norte. Assim a Eq. [6] sofre perdas de radiação por conta do ângulo horário, ω , tornando-se, respectivamente, [7].

$$G_{SRI} = G_{RINC} \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad [7]$$

3. ENERGIA ANUAL NORMALIZADA

Um sistema de 1.138 kWp utilizando 6 módulos Canadian Solar CS6A-190P em série e um inversor Fronius Galvo 1.5-1 para a cidade de Aracaju – Sergipe foi simulado no SAM com utilização de seguimento em um eixo e fixo. Para todas as simulações, foi utilizada a ferramenta Parametrics para determinar a influência da inclinação e do azimute na geração de energia fotovoltaica. Sendo assim, foram estabelecidos 10 ângulos de azimute, variando de norte a sul, e 7 inclinações, variando de 0° a 30°, de acordo com inclinações geralmente utilizadas em telhados de edificações. Utilizando a ferramenta Parametrics, o resultado de energia anual para cada orientação é mostrado na Tab. 1:

Tabela 1. Energia Anual gerada em Aracaju-SE para diferentes orientações.

| Azimute | Sul | | Oeste | | | Norte | | | Leste | |
|----------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 180° | 225° | 270° | 310° | 350° | 0° | 10° | 50° | 90° | 135° |
| Ângulo de inclinação | 0° | 1789.5 | 1789.5 | 1789.5 | 1789.5 | 1789.5 | 1789.5 | 1789.5 | 1789.5 | 1789.5 |
| | 5° | 1767.5 | 1776.8 | 1793.2 | 1805.7 | 1810.3 | 1810.0 | 1809.0 | 1799.6 | 1785.2 |
| | 10° | 1733.2 | 1752.5 | 1786.1 | 1810.4 | 1818.8 | 1818.0 | 1816.1 | 1798.8 | 1771.0 |
| | 15° | 1687.1 | 1717.6 | 1769.7 | 1804.9 | 1815.4 | 1814.2 | 1811.5 | 1788.2 | 1748.0 |
| | 20° | 1629.6 | 1674.1 | 1745.9 | 1789.2 | 1800.5 | 1798.8 | 1795.7 | 1767.5 | 1718.2 |
| | 25° | 1561.2 | 1622.3 | 1715.9 | 1764.0 | 1774.5 | 1772.0 | 1768.6 | 1738.1 | 1683.0 |
| | 30° | 1482.6 | 1563.3 | 1679.0 | 1731.1 | 1737.2 | 1734.2 | 1730.4 | 1701.2 | 1641.3 |

Dividindo todos os valores pelo valor de referência, é possível encontrar a energia anual normalizada, como mostra a Tab. 2:

Tabela 2. Energia Anual gerada em Aracaju-SE para diferentes orientações.

| Azimute | Sul | | Oeste | | | Norte | | | Leste | |
|----------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 180° | 225° | 270° | 310° | 350° | 0° | 10° | 50° | 90° | 135° |
| Ângulo de inclinação | 0° | 0.984 | 0.984 | 0.984 | 0.984 | 0.984 | 0.984 | 0.984 | 0.984 | 0.984 |
| | 5° | 0.972 | 0.977 | 0.986 | 0.993 | 0.996 | 0.995 | 0.995 | 0.990 | 0.982 |
| | 10° | 0.953 | 0.964 | 0.982 | 0.996 | 1.000 | 1.000 | 0.999 | 0.989 | 0.974 |
| | 15° | 0.928 | 0.945 | 0.973 | 0.993 | 0.998 | 0.998 | 0.996 | 0.983 | 0.961 |
| | 20° | 0.896 | 0.921 | 0.960 | 0.984 | 0.990 | 0.989 | 0.988 | 0.972 | 0.945 |
| | 25° | 0.859 | 0.892 | 0.944 | 0.970 | 0.976 | 0.975 | 0.973 | 0.956 | 0.926 |
| | 30° | 0.815 | 0.860 | 0.923 | 0.952 | 0.955 | 0.954 | 0.952 | 0.936 | 0.903 |

Esta tabela demonstra quanto de energia se gera em cada orientação em função da orientação de referência. Por exemplo, um sistema de painéis fotovoltaicos voltado para o sul e com inclinação de 10° geraria 95,3% da energia que



seria gerada caso este sistema estivesse voltado para o norte. A Fig. 2 representa a variação da energia anual normalizada em função do azimute para diferentes inclinações:

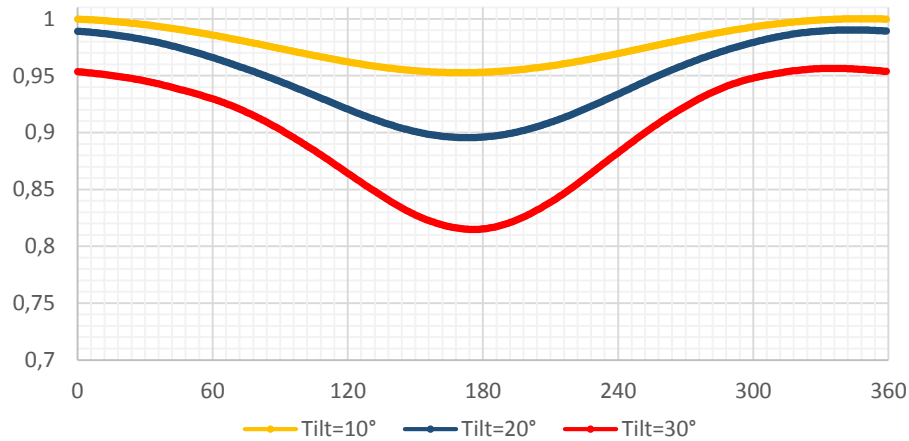


Figura 2. Energia anual normalizada em função do azimute para diferentes inclinações.

A segunda simulação realizada utilizou o mesmo sistema, porém utilizando rastreamento em um eixo. A Tab. 3 mostra os valores de energia anual obtidos nesta simulação:

Tabela 3. Energia Anual gerada em Aracaju-SE para diferentes orientações.

| Azimute | Sul | | Oeste | | | Norte | | | Leste | | |
|----------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 180° | 225° | 270° | 310° | 350° | 0° | 10° | 50° | 90° | 135° | |
| Ângulo de inclinação | 0° | 2423.1 | 2214.1 | 1964.9 | 2181.8 | 2413.0 | 2423.1 | 2410.8 | 2172.9 | 1964.9 | 2222.5 |
| | 5° | 2403.2 | 2198.3 | 1965.8 | 2194.6 | 2426.0 | 2435.7 | 2423.1 | 2181.7 | 1958.5 | 2203.2 |
| | 10° | 2375.9 | 2175.7 | 1960.8 | 2200.6 | 2431.4 | 2440.8 | 2427.9 | 2184.0 | 1946.9 | 2177.4 |
| | 15° | 2341.3 | 2146.6 | 1949.6 | 2199.6 | 2429.0 | 2438.0 | 2424.9 | 2179.4 | 1929.8 | 2145.3 |
| | 20° | 2299.7 | 2111.1 | 1932.5 | 2191.2 | 2418.8 | 2427.3 | 2414.1 | 2167.7 | 1907.5 | 2107.3 |
| | 25° | 2251.4 | 2069.4 | 1910.1 | 2175.8 | 2400.7 | 2408.8 | 2395.5 | 2149.3 | 1880.3 | 2063.5 |
| | 30° | 2197.1 | 2022.4 | 1882.2 | 2153.2 | 2374.8 | 2382.5 | 2369.1 | 2124.1 | 1847.9 | 2014.7 |

Nota-se que a energia gerada por um sistema com rastreamento é consideravelmente maior do que a energia gerada por um sistema fixo. Mesmo na pior condição simulada, a 90° de azimute e inclinação de 30°, a energia gerada por um sistema com rastreamento foi maior do que a energia gerada por um sistema fixo na orientação de referência. Utilizando a mesma metodologia aplicada anteriormente, a energia anual normalizada para um sistema com rastreamento é mostrada na Tab. 3:

Tabela 3. Energia Anual gerada em Aracaju-SE para diferentes orientações.

| Azimute | Sul | | Oeste | | | Norte | | | Leste | | |
|----------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 180° | 225° | 270° | 310° | 350° | 0° | 10° | 50° | 90° | 135° | |
| Ângulo de inclinação | 0° | 0.993 | 0.907 | 0.805 | 0.894 | 0.989 | 0.993 | 0.988 | 0.890 | 0.805 | 0.911 |
| | 5° | 0.985 | 0.901 | 0.805 | 0.899 | 0.994 | 0.998 | 0.993 | 0.894 | 0.802 | 0.903 |
| | 10° | 0.973 | 0.891 | 0.803 | 0.902 | 0.996 | 1.000 | 0.995 | 0.895 | 0.798 | 0.892 |
| | 15° | 0.959 | 0.879 | 0.799 | 0.901 | 0.995 | 0.999 | 0.993 | 0.893 | 0.791 | 0.879 |
| | 20° | 0.942 | 0.865 | 0.792 | 0.898 | 0.991 | 0.994 | 0.989 | 0.888 | 0.781 | 0.863 |
| | 25° | 0.922 | 0.848 | 0.783 | 0.891 | 0.984 | 0.987 | 0.981 | 0.881 | 0.770 | 0.845 |
| | 30° | 0.900 | 0.829 | 0.771 | 0.882 | 0.973 | 0.976 | 0.971 | 0.870 | 0.757 | 0.825 |

A Fig. 3 representa a variação da energia anual normalizada em função do azimute para sistemas com rastreamento:

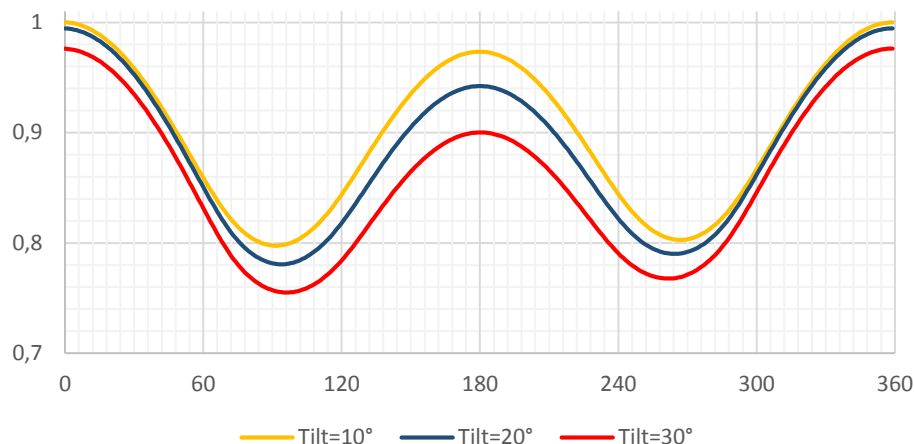


Figura 3. Energia anual normalizada em função do azimute para sistemas com rastreamento.

O aumento de geração de energia proporcionado pelo uso de rastreadores para cada orientação é mostrado na Tab. 4:

Tabela 4. Aumento da energia anual gerada em Aracaju-SE com rastreamento em um eixo.

| Azimute | Sul | | Oeste | | | Norte | | | Leste | | |
|----------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 180° | 225° | 270° | 310° | 350° | 0° | 10° | 50° | 90° | 135° | |
| Ângulo de inclinação | 0° | 35.4% | 23.7% | 9.8% | 21.9% | 34.8% | 35.4% | 34.7% | 21.4% | 9.8% | 24.2% |
| | 5° | 36.0% | 23.7% | 9.6% | 21.5% | 34.0% | 34.6% | 34.0% | 21.2% | 9.7% | 24.4% |
| | 10° | 37.1% | 24.2% | 9.8% | 21.6% | 33.7% | 34.3% | 33.7% | 21.4% | 9.9% | 25.0% |
| | 15° | 38.8% | 25.0% | 10.2% | 21.9% | 33.8% | 34.4% | 33.9% | 21.9% | 10.4% | 26.1% |
| | 20° | 41.1% | 26.1% | 10.7% | 22.5% | 34.3% | 34.9% | 34.4% | 22.6% | 11.0% | 27.4% |
| | 25° | 44.2% | 27.6% | 11.3% | 23.3% | 35.3% | 35.9% | 35.4% | 23.7% | 11.7% | 29.1% |
| | 30° | 48.2% | 29.4% | 12.1% | 24.4% | 36.7% | 37.4% | 36.9% | 24.9% | 12.6% | 31.2% |

4. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados formam um pequeno banco de dados sobre a influência dos ângulos de orientação para sistemas fotovoltaicos com e sem seguimento, além de determinar a influência do rastreamento para diferentes valores de azimute para a cidade de Aracaju. Comprovou-se que a orientação norte-sul é mais vantajosa do que a orientação leste-oeste, como era de se esperar pela teoria.

O azimute tem uma influência tão grande para o sistema com rastreamento que, a depender de sua angulação, o sistema pode gerar 20% menos energia do que a situação ideal. Ficou demonstrado também que sistemas orientados para o sul possuem um aumento muito grande da geração devido à instalação de um seguidor, o que pode ser a diferença entre um projeto ser viável ou não. A partir dos dados aqui apresentados, um engenheiro pode determinar mais facilmente o desempenho dos sistemas fotovoltaicos com variadas orientações, para a cidade de Aracaju, considerando a possibilidade de utilizar ou não um sistema de rastreamento solar.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq.



6. REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 10899 Energia solar fotovoltaica - Terminologia. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2006.
- ALATA M, AL-NIMR MA, QAROUSH Y. **Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control.** Energy Conversion and Management 2005;46: 1229–45.
- DUFFIE, J.A; BCKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes.** 4 edition. Wiley. 2013.
- GASPARIN, P. F., KRENZINGER, A., **Desempenho de um Sistema fotovoltaico em dez cidades brasileiras com diferentes orientações no painel.** VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte, 4 a 7 de abril de 2016.
- ITACA. The Sun as a Source of Energy. Disponível em <http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/part-2-solar-energy-reaching-the-earths-surface/>. Acesso em: 22 de novembro de 2016.
- OLIVEIRA FILHO, J. E. L. **Estudo de Viabilidade Econômica da Inserção de Armazenadores de Energia na Geração Distribuída.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Sergipe, 2016.
- PAULESCU, M.; SCHLETT, Z. **Photovoltaic Conversion of Solar Energy.** Mirton: Timișoara, Romania, 2001.
- PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. **Manual de Engenharia para Sistema Fotovoltaico.** Edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro: Março, 2014.
- SIMÓN-MARTÍN, M.DE; ALONSO-TRISTÁN, C.; DíEZ-MEDIAVILLA, M. **Performance Indicators for Sun-Tracking Systems: A Case Study in Spain.** Energy and Power Engineering, 2014, 6, 292-302.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

SOLAR TRACKER IN THE DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC GENERATION IN ARACAJU - SERGIPE: ENERGY ANALYSIS

Flávio Santiago C. Bispo¹
Pedro Henrique Barzotto Wirti²
Heytell Whitney de Souza Silverio²
Douglas Bressan Riffel²

¹Federal University of Sergipe, Posgraduate Program in Electrical Engineering,

²Federal University of Sergipe, Mechanical Engineering Department,

Abstract: *The present article intends to assist designers in the feasibility study of the use of trackers in photovoltaic distributed generation units. The present analysis was carried out with data from Aracaju, but the adopted methodology allows to replicate the study to other locations. The forecast of the generation in function of the azimuth and the slope are presented using hourly data of solar irradiation and they demonstrate how much energy can be produced to more due to solar tracking.*

Keywords: *solar tracker, technical feasibility, photovoltaic generation*