



RASTREADOR SOLAR NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA EM ARACAJU – SERGIPE: VIABILIDADE ECONÔMICA

Pedro Henrique Barzotto Wirti¹
Heytell Whitney de Souza Silverio¹
Flávio Santiago C. Bispo²
Douglas Bressan Riffel¹

¹Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Mecânica,

²Universidade Federal de Sergipe, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,

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. Instalações capazes de suprir demandas na faixa de 500 a 3000 kWh/mês foram simuladas. Os resultados são apresentados em função do azimute e da inclinação do telhado do possível local de instalação e representam o investimento máximo que permite sua viabilidade financeira em função do custo específico do módulo fotovoltaico e do inversor.

Palavras-chave: rastreador solar, viabilidade econômica, 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.

Por fim, foi determinado o valor máximo a ser investido na instalação de rastreadores para perfis de consumo variados, desde residenciais a comerciais de pequeno porte. Para tanto, foram dimensionados os sistemas fotovoltaicos para cada nível de consumo e então feita uma redução da potência instalada com base no aumento de geração devido ao rastreamento, mantendo uma geração anual de energia constante.

2. VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DE RASTREADORES SOLARES

Utilizando os valores de aumento de geração devido ao rastreador, da Tab. 4 do artigo Bispo et al. (2016), foi proposta uma redução do sistema, de maneira a manter a energia gerada constante após a instalação do seguidor solar. Para isto, determinou-se que seriam dimensionados sistemas fotovoltaicos para geração em residências e estabelecimentos comerciais de pequeno porte. Para dimensionar estes sistemas utilizou-se a seguinte fórmula, encontrada no livro Manual de Engenharia para Sistema Fotovoltaico (PINHO, 2014):

$$P_{FV}(Wp) = \frac{(E/TD)}{HSPMA} \quad [1]$$

onde PFV (Wp) é a potência de pico do painel, E (Wh/dia) é o consumo diário médio anual da edificação ou fração deste, TD é a taxa de taxa de desempenho e HSPMA é a média diária anual das horas de sol pleno incidente no plano do painel. Para a localidade de Aracaju, valores típicos para HSP e TD são 6,02 h/dia e 71%, respectivamente. Para determinar o consumo médio diário, foram considerados consumos mensais de 500 kWh, 750 kWh, 1000 kWh, 1500 kWh, 2000 kWh



e 3000 kWh. Ficou determinado que a razão entre a potência de corrente contínua instalada e a potência de corrente alternada instalada seria de 1,38, pois esta é a relação que otimiza o tamanho do inversor. A Tab. 1 mostra os valores de potência dos módulos e dos inversores dimensionados para cada nível de consumo:

Tabela 1. Potência dos Módulos FV e dos Inversores.

Consumo Mensal [kWh]	Potência dos Módulos [kWp]	Potência do Inversor [kW]
500	3.7	2.7
750	5.5	4.0
1000	7.4	5.3
1500	11.1	8.0
2000	14.8	10.7
3000	22.1	16.0

A potência a ser reduzida do sistema em cada orientação devido ao rastreamento é dada pela equação abaixo:

$$P_r = P_s * \left(1 - \frac{1}{1+R_{ij}}\right) \quad [2]$$

onde P_r é a potência a ser reduzida dos módulos ou inversores, P_s é a potência inicial do sistema, R_{ij} é o aumento de geração proporcionado na inclinação i e no azimute j . A porcentagem a ser reduzida da potência inicial afeta na mesma proporção os módulos e os inversores, já que a razão de 1,1 se mantém constante. Para calcular o valor máximo que pode ser investido no sistema de rastreamento para que não se exceda o valor de investimento inicial, mantendo a viabilidade econômica do projeto, foi estabelecida a seguinte equação:

$$V_{Max} = a * \$/W_p + b * \$/W_{ac} \quad [3]$$

onde V_{Max} é o valor máximo que pode ser investido no rastreamento, a é a redução de potência dos módulos, b é a redução de potência do inversor, $\$/W_p$ é o preço do módulo por Watt pico (Wp) e $\$/W_{ac}$ é o preço do inversor por unidade de potência (Wac).

Desta maneira, foram montadas tabelas com os valores de (a) e (b) a partir da Eq. [3] para cada sistema com variadas orientações de azimute e inclinação. As tabelas a seguir apresentam os valores de (a) e (b) para o sistema dimensionado para um consumo de 500, 750, 1000, 1500, 2000 e 3000 kWh:

Tabela 2. Valor máximo permitido para investimento em rastreador para consumo mensal de 500kWh
[Vm = (a*\$/Wp)+(b*\$/Wac)].

Azimute (°)		180		225		270		310		350	
		(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
Inclinação (°)	0	967.46	701.06	709.55	514.17	330.35	239.38	665.20	482.03	956.02	692.77
	5	978.64	709.16	709.35	514.02	324.94	235.47	655.62	475.09	938.95	680.40
	10	1000.91	725.30	719.79	521.59	329.56	238.81	656.06	475.41	932.28	675.56
	15	1033.95	749.24	739.36	535.76	341.34	247.34	664.00	481.16	934.74	677.35
	20	1078.17	781.28	766.02	555.08	357.22	258.85	678.78	491.87	945.71	685.30
	25	1134.35	821.99	799.45	579.31	376.28	272.67	700.18	507.38	965.09	699.34
	30	1203.16	871.86	839.88	608.61	399.36	289.39	725.39	525.65	993.32	719.80
Azimute (°)		0		10		50		90		135	
		(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
Inclinação (°)	0	967.46	701.06	953.54	690.97	652.89	473.11	330.35	239.38	720.81	522.33
	5	950.55	688.80	937.80	679.56	648.01	469.57	327.32	237.19	725.59	525.79
	10	944.01	684.06	932.37	675.63	652.62	472.91	334.33	242.27	740.84	536.84
	15	946.69	686.01	935.93	678.21	664.19	481.30	348.43	252.49	765.13	554.44
	20	958.11	694.28	947.86	686.85	683.03	494.95	367.09	266.01	796.41	577.11
	25	978.06	708.74	968.28	701.65	707.85	512.94	388.14	281.26	834.51	604.72
	30	1006.79	729.56	997.58	722.88	736.66	533.81	413.63	299.73	879.84	637.57



**Tabela 3. Valor máximo permitido para investimento em rastreador para consumo mensal de 750kWh
[$V_m = (a*\$/W_p) + (b*\$/W_{ac})$].**

Azimute (°)		180		225		270		310		350	
		(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
Inclinação (°)	0	1438.11	1042.11	1054.74	764.30	491.06	355.84	988.81	716.53	1421.11	1029.79
	5	1454.74	1054.16	1054.43	764.08	483.03	350.02	974.57	706.21	1395.74	1011.41
	10	1487.84	1078.15	1069.96	775.33	489.88	354.99	975.23	706.69	1385.82	1004.22
	15	1536.95	1113.73	1099.04	796.41	507.39	367.67	987.02	715.23	1389.49	1006.87
	20	1602.68	1161.36	1138.67	825.12	531.00	384.78	1008.99	731.16	1405.79	1018.69
	25	1686.19	1221.88	1188.37	861.14	559.33	405.32	1040.81	754.21	1434.59	1039.56
	30	1788.48	1296.00	1248.46	904.68	593.64	430.17	1078.29	781.37	1476.56	1069.97
Azimute (°)		0		10		50		90		135	
		(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
Inclinação (°)	0	1438.11	1042.11	1417.42	1027.12	970.52	703.27	491.06	355.84	1071.48	776.43
	5	1412.98	1023.90	1394.03	1010.16	963.26	698.01	486.56	352.58	1078.58	781.58
	10	1403.26	1016.85	1385.95	1004.31	970.11	702.98	496.98	360.13	1101.25	798.01
	15	1407.24	1019.74	1391.25	1008.15	987.31	715.44	517.94	375.32	1137.36	824.17
	20	1424.21	1032.04	1408.97	1021.00	1015.32	735.74	545.67	395.41	1183.85	857.86
	25	1453.88	1053.53	1439.33	1042.99	1052.21	762.47	576.97	418.09	1240.49	898.90
	30	1496.58	1084.48	1482.88	1074.55	1095.04	793.51	614.85	445.54	1307.87	947.73

**Tabela 4. Valor máximo permitido para investimento em rastreador para consumo mensal de 1000kWh
[$V_m = (a*\$/W_p) + (b*\$/W_{ac})$].**

Azimute (°)		180		225		270		310		350	
		(a)	(b)								
Inclinação (°)	0	1930.42	1398.85	1415.80	1025.94	659.16	477.65	1327.30	961.81	1907.59	1382.31
	5	1952.74	1415.03	1415.40	1025.65	648.38	469.84	1308.19	947.96	1873.54	1357.64
	10	1997.17	1447.23	1436.23	1040.75	657.58	476.51	1309.07	948.60	1860.22	1347.99
	15	2063.09	1494.99	1475.27	1069.04	681.08	493.54	1324.91	960.08	1865.14	1351.55
	20	2151.32	1558.93	1528.47	1107.59	712.77	516.50	1354.40	981.45	1887.03	1367.41
	25	2263.42	1640.16	1595.18	1155.93	750.81	544.07	1397.11	1012.40	1925.69	1395.43
	30	2400.73	1739.66	1675.85	1214.38	796.86	577.43	1447.42	1048.85	1982.03	1436.25
Azimute (°)		0		10		50		90		135	
		(a)	(b)								
Inclinação (°)	0	1930.42	1398.85	1902.64	1378.73	1302.75	944.02	659.16	477.65	1438.27	1042.23
	5	1896.68	1374.41	1871.24	1355.97	1293.01	936.96	653.12	473.27	1447.81	1049.14
	10	1883.63	1364.95	1860.40	1348.12	1302.20	943.62	667.11	483.42	1478.24	1071.19
	15	1888.98	1368.83	1867.51	1353.27	1325.29	960.35	695.24	503.80	1526.71	1106.31
	20	1911.76	1385.33	1891.30	1370.51	1362.89	987.60	732.47	530.78	1589.11	1151.53
	25	1951.58	1414.19	1932.05	1400.04	1412.42	1023.49	774.48	561.22	1665.14	1206.62
	30	2008.90	1455.72	1990.52	1442.40	1469.90	1065.15	825.33	598.07	1755.59	1272.17

Tabela 5. Valor máximo permitido para investimento em rastreador para consumo mensal de 1500kWh
 $[V_m = (a * \$/W_p) + (b * \$/W_{ac})]$.

Azimute (°)		180		225		270		310		350	
		(a)	(b)								
Inclinação (°)	0	2895.62	2098.28	2123.70	1538.91	988.74	716.48	1990.95	1442.72	2861.39	2073.47
	5	2929.11	2122.54	2123.09	1538.47	972.57	704.76	1962.28	1421.94	2810.32	2036.46
	10	2995.76	2170.84	2154.35	1561.12	986.38	714.77	1963.61	1422.91	2790.33	2021.98
	15	3094.63	2242.49	2212.91	1603.56	1021.63	740.31	1987.36	1440.12	2797.72	2027.33
	20	3226.99	2338.40	2292.70	1661.38	1069.16	774.75	2031.60	1472.17	2830.54	2051.12
	25	3395.13	2460.24	2392.78	1733.90	1126.22	816.10	2095.67	1518.60	2888.53	2093.14
	30	3601.09	2609.49	2513.77	1821.57	1195.29	866.15	2171.12	1573.28	2973.04	2154.38
Azimute (°)		0		10		50		90		135	
		(a)	(b)								
Inclinação (°)	0	2895.62	2098.28	2853.96	2068.09	1954.12	1416.03	988.74	716.48	2157.41	1563.34
	5	2845.02	2061.61	2806.86	2033.96	1939.51	1405.44	979.68	709.91	2171.71	1573.70
	10	2825.44	2047.42	2790.60	2022.18	1953.30	1415.44	1000.67	725.12	2217.36	1606.78
	15	2833.47	2053.24	2801.27	2029.91	1987.93	1440.53	1042.86	755.70	2290.06	1659.46
	20	2867.64	2078.00	2836.96	2055.77	2044.33	1481.40	1098.71	796.16	2383.67	1727.30
	25	2927.36	2121.28	2898.08	2100.06	2118.62	1535.23	1161.72	841.83	2497.71	1809.93
	30	3013.34	2183.58	2985.77	2163.60	2204.85	1597.72	1238.00	897.10	2633.39	1908.25

Tabela 6. Valor máximo permitido para investimento em rastreador para consumo mensal de 2000kWh
 $[V_m = (a * \$/W_p) + (b * \$/W_{ac})]$.

Azimute (°)		180		225		270		310		350	
		(a)	(b)								
Inclinação (°)	0	3860.83	2797.70	2831.60	2051.89	1318.32	955.30	2654.60	1923.62	3815.19	2764.63
	5	3905.47	2830.05	2830.79	2051.30	1296.76	939.68	2616.38	1895.92	3747.09	2715.28
	10	3994.34	2894.45	2872.47	2081.50	1315.17	953.02	2618.15	1897.21	3720.44	2695.97
	15	4126.17	2989.98	2950.55	2138.08	1362.17	987.08	2649.82	1920.16	3730.29	2703.11
	20	4302.65	3117.86	3056.94	2215.17	1425.54	1033.00	2708.80	1962.90	3774.05	2734.82
	25	4526.84	3280.32	3190.37	2311.86	1501.62	1088.13	2794.23	2024.80	3851.37	2790.85
	30	4801.46	3479.32	3351.70	2428.77	1593.72	1154.87	2894.83	2097.70	3964.05	2872.50
Azimute (°)		0		10		50		90		135	
		(a)	(b)								
Inclinação (°)	0	3860.83	2797.70	3805.29	2757.45	2605.50	1888.04	1318.32	955.30	2876.55	2084.45
	5	3793.36	2748.81	3742.48	2711.94	2586.01	1873.92	1306.23	946.55	2895.62	2098.27
	10	3767.26	2729.90	3720.80	2696.23	2604.40	1887.25	1334.23	966.83	2956.48	2142.38
	15	3777.96	2737.65	3735.03	2706.54	2650.58	1920.71	1390.48	1007.60	3053.41	2212.62
	20	3823.52	2770.67	3782.61	2741.02	2725.78	1975.20	1464.94	1061.55	3178.23	2303.07
	25	3903.15	2828.37	3864.11	2800.08	2824.83	2046.98	1548.96	1122.44	3330.28	2413.24
	30	4017.79	2911.44	3981.03	2884.81	2939.80	2130.29	1650.66	1196.13	3511.19	2544.34

Tabela 7. Valor máximo permitido para investimento em rastreador para consumo mensal de 3000kWh
[$V_m = (a \cdot \$/W_p) + (b \cdot \$/W_{ac})$].

Azimute (°)		180		225		270		310		350	
		(a)	(b)								
Inclinação (°)	0	5791.25	4196.56	4247.40	3077.83	1977.47	1432.95	3981.90	2885.43	5722.78	4146.94
	5	5858.21	4245.08	4246.19	3076.95	1945.13	1409.52	3924.56	2843.89	5620.63	4072.92
	10	5991.51	4341.68	4308.70	3122.25	1972.75	1429.53	3927.22	2845.81	5580.66	4043.96
	15	6189.26	4484.97	4425.82	3207.12	2043.25	1480.62	3974.72	2880.23	5595.43	4054.66
	20	6453.97	4676.79	4585.41	3322.76	2138.32	1549.51	4063.20	2944.35	5661.08	4102.23
	25	6790.27	4920.48	4785.55	3467.79	2252.43	1632.20	4191.34	3037.20	5777.06	4186.28
	30	7202.19	5218.98	5027.54	3643.15	2390.58	1732.30	4342.25	3146.56	5946.08	4308.75
Azimute (°)		0		10		50		90		135	
		(a)	(b)								
Inclinação (°)	0	5791.25	4196.56	5707.93	4136.18	3908.25	2832.06	1977.47	1432.95	4314.82	3126.68
	5	5690.04	4123.22	5613.72	4067.91	3879.02	2810.88	1959.35	1419.82	4343.43	3147.41
	10	5650.89	4094.85	5581.20	4044.35	3906.61	2830.87	2001.34	1450.25	4434.72	3213.57
	15	5666.94	4106.48	5602.54	4059.81	3975.86	2881.06	2085.72	1511.39	4580.12	3318.93
	20	5735.28	4156.00	5673.91	4111.53	4088.67	2962.80	2197.41	1592.33	4767.34	3454.60
	25	5854.73	4242.56	5796.16	4200.12	4237.25	3070.47	2323.44	1683.65	4995.41	3619.86
	30	6026.69	4367.16	5971.55	4327.21	4409.70	3195.44	2475.99	1794.20	5266.78	3816.51

Para determinar o valor de fato que pode ser dispendido na instalação de rastreadores, o consumidor deve fazer um levantamento do preço a ser pago pelo kWp e pelo kW do inversor, para então fazer a multiplicação dos valores e achar a quantidade de dinheiro que pode ser investida. A Fig. 1 representa a variação da redução da potência do sistema em função do azimute para três diferentes inclinações:

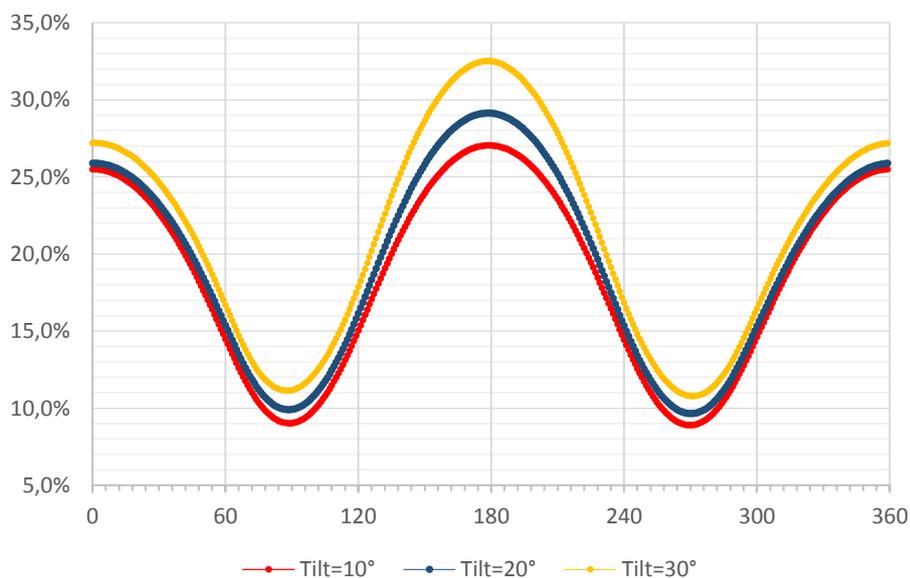


Figura 1. Redução de Potência de Módulos e Inversores em Função do Azimute para Diferentes Inclinações.



3. 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.

Este trabalho oferece dados mais sólidos para embasar a análise de viabilidade técnica e econômica para qualquer residência ou estabelecimento comercial locais, fornecendo uma maneira de se determinar o valor máximo que pode ser gasto na instalação do sistema de seguimento.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq.

5. 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.
- BISPO, F.S., WIRTI, P.H.B., SILVERIO, H.W.S. E RIFFEL, D.B., **Rastreador solar na geração fotovoltaica distribuída em aracaju – sergipe: análise energética.** Simpósio Sergipano de Energia Solar, Aracaju, 1 a 3 de dezembro de 2016.
- 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.
- 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.
- 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.

6. DIREITOS AUTORAIS

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