

DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM DEZ CIDADES BRASILEIRAS COM DIFERENTES ORIENTAÇÕES DO PAINEL

Fabiano Perin Gasparin– fabiano-gasparin@uergs.edu.br

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

Arno Krenzinger– arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são uma opção cada vez mais viável para produção de eletricidade no Brasil. Por ser uma fonte intermitente de energia dependente de diversas variáveis, a análise e dimensionamento destes sistemas é primariamente realizada com programas de simulação. Uma análise simplificada do sistema baseada somente em médias de irradiação mensal, por exemplo, não permite o estudo do impacto do ângulo de inclinação e orientação do arranjo fotovoltaico na produção anual de eletricidade com o nível de detalhamento necessário. No estudo realizado neste trabalho foi utilizada a ferramenta SAM (System Advisor Model) para a simulação de um sistema fotovoltaico residencial típico de 1500 W_p em dez cidades brasileiras, compreendendo as inclinações do painel fotovoltaico entre 0 e 90° e ângulo de azimute compreendendo todas as direções. Os resultados indicam que há uma faixa relativamente ampla de inclinações e orientações do arranjo fotovoltaico em que a produção anual de eletricidade difere de apenas 1 % de um sistema de referência, isto é, com a orientação considerada ideal, onde a inclinação do arranjo fotovoltaico é igual à latitude local e orientado para o norte geográfico. Além destes resultados, esta metodologia permite verificar se é preferível utilizar uma orientação a leste ou oeste frente a alguma restrição de instalação e estimar a perda anual de energia gerada comparada à situação de referência. Foram utilizados dados de um arquivo climático horário para cada cidade, no formato de ano meteorológico típico. Para uma análise segura, a simulação do desempenho deve ser realizada para cada local de interesse no momento do projeto. Este fato reforça a necessidade da produção de arquivos climáticos confiáveis para um maior número de cidades brasileiras e que só podem ser obtidos com medidas a partir de estações solarimétricas de qualidade ao longo de vários anos, realidade que precisa ser aperfeiçoada no Brasil.

Palavras-chave: Energia Solar, Sistema fotovoltaico, Ângulo de orientação.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da participação das fontes renováveis na matriz energética é fundamental para a redução das emissões resultantes da queima de combustíveis fósseis. No caso do Brasil, onde a produção de eletricidade é essencialmente hidroelétrica, há a necessidade da diversificação da matriz elétrica, pois esta requer suporte de fontes térmicas em momentos de baixa disponibilidade hídrica. A energia solar fotovoltaica, que é a conversão direta da energia da radiação solar em energia elétrica, é uma forma alternativa de energia em grande expansão mundial desde meados do ano 2000. Segundo dados do relatório da Agência Internacional de Energia (IEA, 2015), no ano de 2014 foram inseridos 38,7 GW_p em instalações fotovoltaicas na rede elétrica mundial. Em termos globais, no final de 2014 já havia aproximadamente 177 GW_p de potência em instalações fotovoltaicas.

Por se tratar de uma forma intermitente de geração de energia condicionada às variáveis ambientais, a simulação computacional do desempenho esperado de um sistema fotovoltaico é indispensável para análise do projeto. Os programas de simulação computacional permitem a realização do dimensionamento, verificação da viabilidade econômica e da produtividade ao longo da vida útil do sistema, mediante a entrada de parâmetros apropriados. Nos anos recentes foram desenvolvidos diversos programas computacionais disponíveis tanto comercialmente quanto no meio acadêmico para este fim. Lalwani et al. (2010) apresentam um elenco com diversos programas de simulação de sistemas fotovoltaicos, compreendendo um total de 12 softwares relevantes no mercado. Merecem destaque os programas gratuitos RETScreen (2014) e SAM – NREL (2014) e os programas pagos PVSyst, PV F-chart e TRNSYS.

A análise de projetos fotovoltaicos é constante objeto de estudos em publicações científicas como a de Ordenes et al (2007) que analisou o potencial de sete tecnologias de sistemas fotovoltaicos integrados na edificação em sete cidades brasileiras. Já Rüther & Braun (2009) analisaram o potencial de sistemas fotovoltaicos integrados em aeroportos. No trabalho de Rüther & Zilles (2011) é realizado um diagnóstico e defesa da importância da energia solar fotovoltaica no Brasil. O potencial das instalações fotovoltaicas auxiliarem durante os momentos de pico de demanda elétrica também é relevante no cenário nacional e é detalhado em Rüther et al. (2008). O tema está em constante evolução, principalmente no Brasil, pois os preços dos componentes dos sistemas fotovoltaicos, bem como a legislação evoluem constantemente e a demanda por informações atualizadas é importante. A necessidade de estimativas de desempenho confiáveis e principalmente o tratamento da parte econômica e financeira dos projetos torna a simulação computacional a ferramenta ideal para a tarefa, dada a complexidade dos modelos físicos e econômicos envolvidos.

A geração com energia solar fotovoltaica é uma opção cada vez mais atraente, sendo que a microgeração e a minigeração distribuídas foram regulamentadas pela resolução 482/2012 e 687/2015 da ANEEL. A opção por instalações centralizadas em grandes usinas também já é uma opção real no Brasil com a concretização do leilão de energia de reserva realizado em 31/10/2014, cuja análise pode ser encontrada na nota técnica da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014). No primeiro leilão de energia de reserva 2015 foram contratados 1047 MW_p e a análise das características dos projetos vencedores pode ser encontrada em EPE (2015).

O NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) dos EUA desenvolveu a ferramenta computacional SAM (*System Advisor Model*), que possui módulos de simulação de projetos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFRC), englobando os modelos físicos de desempenho e os modelos econômico-financeiros. Como exemplos de publicações de trabalhos com resultados obtidos pelo SAM podem ser citados Blair et al. (2012), Blair et al. (2008) e Dobos et al (2012).

O desempenho do sistema fotovoltaico é dependente da radiação solar incidente no plano dos módulos, da temperatura de operação dos módulos, da curva de desempenho do inversor e das perdas do sistema como as registradas na fiação e conexões, perdas por descasamento de parâmetros dos módulos, degradação ao longo do tempo, entre outros. A análise do ângulo de orientação do arranjo fotovoltaico no dimensionamento também é importante, porém sem a utilização de uma simulação horária ao longo do ano não é possível chegar a resultados conclusivos sobre a real influência do ângulo no desempenho global do sistema. A simulação permite inclusive, o cálculo da viabilidade da instalação do arranjo em uma área de telhado voltado para o leste, para o oeste ou mesmo para o sul, por exemplo. No trabalho de Kormann et al (2014) foram desenvolvidos com o uso do SAM mapas de avaliação de desempenho de sistemas fotovoltaicos em função do ângulo de orientação para duas cidades brasileiras com disponibilidades diferentes de radiação solar.

Sob o ponto de vista puramente geométrico, a melhor orientação para um arranjo fotovoltaico para a produção anual de eletricidade no hemisfério sul é aquela com inclinação igual ao da latitude local e orientado para o norte geográfico. Convém destacar que o clima de um determinado local possui características próprias e que, há casos em que a energia anual nem sempre é a maior possível quando os módulos estão na orientação considerada ideal ou de referência. Pode ocorrer que a diferença na produção anual de energia seja desprezível frente a uma faixa de variação de orientações em torno da orientação de referência.

Neste trabalho, o software SAM foi utilizado para simular um sistema fotovoltaico residencial de 1500 W_p em dez cidades brasileiras. Além dos parâmetros de desempenho calculados, foi feita uma análise paramétrica da influência da orientação do arranjo fotovoltaico na produção anual de eletricidade. Esta análise é importante uma vez que os telhados onde são instalados os módulos fotovoltaicos podem possuir diversas orientações e o resultado pode relativizar a importância de se instalar os módulos na orientação considerada ideal, quando se analisa a produção anual de eletricidade. É importante destacar que não é somente a disponibilidade de radiação no plano do arranjo fotovoltaico que afeta o desempenho do sistema, mas os efeitos decorrentes da temperatura de operação dos módulos e o ponto de funcionamento do inversor, que possui uma curva de eficiência variável com o carregamento. Esta análise é mais ampla do que apenas o cálculo da disponibilidade de radiação em determinado plano inclinado e, portanto um modelo completo de desempenho torna-se a ferramenta própria para a realização de comparações.

2. METODOLOGIA

A análise da influência da orientação do arranjo fotovoltaico na produção anual de eletricidade foi realizada para 10 cidades selecionadas que possuem arquivos climáticos do tipo TMY3 (*Typical Meteorological Year*) no programa SAM. Os dados horários do arquivo TMY3 utilizados pelo modelo incluem a radiação direta normal, radiação difusa horizontal, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa, velocidade do vento, além dos dados de latitude, longitude e altitude do local.

As simulações de desempenho foram realizadas tendo como base um sistema fotovoltaico de 1500 W_p típico para uma residência, e assim foi obtido o impacto que o ângulo de orientação do arranjo em comparação com a orientação considerada de referência causa na energia anual produzida. Destacando que a orientação de referência possui ângulo azimutal de 0° e ângulo de inclinação dos módulos igual à latitude local. Para a simulação no SAM foi escolhido o modelo de desempenho completo de um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFRC) para uso residencial, baseado nas curvas características e de eficiência de componentes disponíveis no mercado. O sistema simulado é composto por 6 módulos de silício multicristalino de 250 W_p conectados em série a um inversor Fronius Galvo 1,5-1. O modelo de radiação difusa utilizado nas simulações é o Modelo de Perez e o albedo utilizado foi 0,2 e para a determinação da temperatura dos módulos foi utilizado o método NOCT (*nominal operating cell temperature*). O sistema foi simulado com os mesmos parâmetros em todos os casos fazendo o ângulo de inclinação variar entre 0° e 90° com um maior refinamento da faixa de inclinação correspondente às latitudes brasileiras, ou seja, entre 0 e 35°. A variação do ângulo azimutal compreendeu os 360°, com menor refinamento na orientação sul, por ter interesse reduzido para aplicações fotovoltaicas. Foi utilizada a definição de azimute da superfície baseada no norte verdadeiro, onde 0° indica o norte e o deslocamento positivo é em direção leste compreendendo ângulos entre 0 e 359°.

3. RESULTADOS

Os resultados dos parâmetros gerais de desempenho do sistemas das dez cidades selecionadas são apresentados na Tab. 1. O Brasil é um país com dimensões continentais ocupando uma grande faixa de latitudes, de maneira que as cidades selecionadas servem para ilustrar resultados representativos de diversos climas brasileiros. Convém destacar que os resultados são essencialmente válidos apenas para as cidades específicas ou no máximo para locais próximos com climas semelhantes, uma vez que os arquivos climáticos utilizados são dos locais específicos.

Tabela 1 – Parâmetros de desempenho de um sistema fotovoltaico de referência de 1500 W_p, com inclinação igual à latitude local e ângulo azimutal 0°.

Cidade	Latitude	Energia Anual (kWh)	Produtividade (kWh/kW _p)	Taxa de desempenho	Fator de capacidade (%)
Santa Maria - RS	29,7°S	2047	1362	0,78	15,5
Curitiba - PR	25,52°S	1920	1277	0,78	14,6
São Paulo - SP	23,62°S	2079	1383	0,77	15,8
Rio de Janeiro - RJ	22,9°S	2276	1514	0,77	17,3
Campo Grande - MS	20,47°S	2364	1573	0,77	18,0
Belo Horizonte - MG	19,85°S	2341	1558	0,76	17,8
Brasília - DF	15,87°S	2379	1583	0,77	18,1
Bom Jesus da Lapa - BA	13,27°S	2463	1639	0,74	18,7
Fortaleza - CE	3,78°S	2326	1548	0,77	17,7
Manaus - AM	3,13°S	1933	1286	0,73	14,7

Para cada uma das cidades foi realizada a simulação do arranjo fotovoltaico em diversas orientações. O valor da energia anual obtida para cada um dos ângulos e orientações foi normalizado pela energia obtida pelo sistema de referência. Desta maneira, todos os resultados apresentados são relativos ao sistema de referência, tornando fácil a verificação da perda de energia anual em relação à várias orientações do paine.

A Fig. 1 apresenta os resultados para a cidade de Santa Maria – RS.

azimute	Sul		Oeste							Norte								Leste
(°)	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135
ângulo de inclinação (°)	0	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
	5	0.89	0.90	0.92	0.93	0.94	0.94	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.92	0.90
	10	0.86	0.88	0.92	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.93	0.91	0.87
	15	0.82	0.85	0.91	0.94	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.97	0.96	0.93	0.84
	20	0.77	0.81	0.90	0.94	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.93	0.81
	25	0.72	0.78	0.88	0.93	0.96	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.92	0.77
	30	0.67	0.74	0.87	0.92	0.96	0.97	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.95	0.91	0.73
	35	0.62	0.70	0.85	0.90	0.95	0.96	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.95	0.94	0.89	0.69
	40	0.57	0.66	0.82	0.88	0.93	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.94	0.92	0.87	0.65
	50	0.48	0.58	0.77	0.84	0.89	0.91	0.92	0.93	0.93	0.93	0.92	0.91	0.89	0.88	0.82	0.76	0.58
	60	0.40	0.51	0.71	0.78	0.83	0.84	0.86	0.86	0.87	0.87	0.86	0.86	0.85	0.83	0.82	0.77	0.51
	70	0.32	0.45	0.65	0.71	0.75	0.77	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.77	0.77	0.76	0.74	0.70	0.44
	80	0.27	0.40	0.58	0.64	0.67	0.68	0.68	0.68	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.63	0.57	0.39
	90	0.24	0.35	0.52	0.56	0.58	0.58	0.58	0.57	0.56	0.56	0.56	0.57	0.57	0.57	0.55	0.50	0.35

Figura 1 – Energia anual normalizada do SFCR para diversos ângulos de orientação em Santa Maria – RS.

A partir da primeira análise da Fig. 1 depreende-se que a energia anual produzida difere em menos de 1% para uma faixa relativamente ampla de orientação do arranjo fotovoltaico. Os dados mostram também que mesmo telhados orientados em até 50° para nordeste ou noroeste com inclinações de 15 a 20° ainda apresentam uma produção anual estimada apenas 5 % inferior ao sistema fotovoltaico de referência, como orientação considerada ideal geometricamente. Outro dado interessante desta análise é a possibilidade de verificar a viabilidade de uma instalação em uma edificação cujas águas dos telhados sejam orientadas nas direções leste/oeste, permitindo decidir qual a orientação preferencial em um caso destes. Para Santa Maria, a diferença da energia entre uma orientação leste ou oeste não chega a ser relevante, sendo que a simulação resultou em produção anual 1% maior na orientação oeste quando comparada com a orientação leste. A orientação que apresentou o melhor desempenho anual foi com ângulo de 25° e azimute 0°, porém apenas 0,15 % superior ao resultado de referência e, portanto não aparece detalhado nos resultados que estão restritos a uma resolução de 1%. É importante destacar que em instalações de usinas fotovoltaicas no solo, uma inclinação menor dos módulos fotovoltaicos é preferível a uma inclinação maior, pois além da produção de eletricidade anual não ser substancialmente afetada como previsto na simulação, a menor inclinação permite o maior adensamento das fileiras de

módulos fotovoltaicos. Com a distância entre fileiras para evitar o sombreamento reduzida há a melhor ocupação do terreno.

Os resultados da análise para a cidade de Curitiba-PR são apresentados na Fig. 2, onde também é possível verificar uma faixa relativamente ampla de orientações em que a produção anual de eletricidade difere em até 1% do sistema de referência. A simulação com os dados climáticos de Curitiba permite observar uma pequena vantagem nas orientações a oeste em relação às orientações a leste. É possível depreender a partir destes resultados que há uma maior disponibilidade de radiação no período da tarde. Pode-se conjecturar que este resultado é decorrente da característica do clima local que apresenta neblinas matutinas em determinados períodos do ano. Dentre os ângulos utilizados para a simulação, o maior valor de eletricidade anual produzida foi encontrado para inclinação de 25° e azimute 350°, embora o resultado seja apenas 0,16 % maior que o valor de referência, ou seja, pouco relevante do ponto de vista energético frente às incertezas envolvidas.

azimute (°)	Sul		Oeste							Norte							Leste	
	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135
ângulo de inclinação (°)	0	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
	5	0.89	0.90	0.93	0.94	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.92	0.90
	10	0.86	0.88	0.93	0.94	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.95	0.95	0.93	0.91	0.87
	15	0.82	0.86	0.92	0.95	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.92	0.84
	20	0.78	0.82	0.91	0.95	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.92	0.80
	25	0.73	0.79	0.90	0.94	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.96	0.94	0.90	0.77
	30	0.67	0.75	0.88	0.93	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.89	0.73
	35	0.62	0.71	0.86	0.91	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.92	0.87	0.68
	40	0.57	0.67	0.84	0.89	0.94	0.96	0.97	0.97	0.98	0.97	0.95	0.94	0.92	0.92	0.90	0.85	0.64
	50	0.48	0.59	0.78	0.85	0.89	0.91	0.92	0.93	0.93	0.93	0.92	0.91	0.89	0.87	0.85	0.79	0.56
	60	0.41	0.52	0.72	0.79	0.83	0.85	0.86	0.86	0.86	0.85	0.84	0.82	0.80	0.78	0.73	0.67	0.49
	70	0.33	0.45	0.65	0.72	0.76	0.77	0.78	0.78	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.72	0.70	0.66	0.43
	80	0.28	0.39	0.58	0.64	0.67	0.68	0.68	0.68	0.67	0.66	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.58	0.38
	90	0.24	0.35	0.51	0.56	0.58	0.58	0.58	0.57	0.56	0.55	0.55	0.54	0.54	0.53	0.51	0.47	0.33

Figura 2 – Energia anual normalizada do SFCR sob diversos ângulos de orientação em Curitiba – PR.

Os resultados da simulação para a cidade de São Paulo são apresentados na Fig. 3, e de certa maneira são semelhantes ao de Santa Maria e Curitiba em termos da influência dos ângulo de inclinação. Uma observação pertinente é que há uma pequena vantagem energética para arranjos orientados a leste em comparação com os arranjos orientados a oeste, diferentemente do que foi obtido para Curitiba. No caso de São Paulo, nenhuma orientação diversa daquela de referência apresentou produção de energia anual maior do que 0,1 % em relação ao sistema com ângulo igual à latitude e orientado para o norte.

azimute (°)	Sul		Oeste							Norte							Leste	
	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135
ângulo de inclinação (°)	0	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
	5	0.91	0.91	0.93	0.94	0.95	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.92
	10	0.88	0.89	0.92	0.94	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.95	0.93	0.89
	15	0.84	0.86	0.91	0.94	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.87
	20	0.80	0.82	0.90	0.93	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.95	0.91	0.84
	25	0.75	0.79	0.88	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.94	0.90	0.80
	30	0.70	0.75	0.85	0.90	0.94	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.96	0.93	0.77
	35	0.65	0.71	0.83	0.88	0.92	0.94	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.91	0.73
	40	0.59	0.66	0.80	0.86	0.90	0.92	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.97	0.96	0.94	0.93	0.89	0.69
	50	0.50	0.58	0.74	0.80	0.85	0.87	0.89	0.90	0.91	0.92	0.92	0.92	0.91	0.90	0.88	0.84	0.61
	60	0.42	0.50	0.68	0.74	0.79	0.80	0.82	0.83	0.84	0.85	0.85	0.85	0.84	0.83	0.82	0.77	0.53
	70	0.35	0.44	0.61	0.67	0.71	0.72	0.74	0.74	0.75	0.76	0.76	0.76	0.75	0.74	0.70	0.65	0.47
	80	0.29	0.38	0.54	0.59	0.62	0.63	0.64	0.64	0.65	0.65	0.65	0.66	0.66	0.66	0.65	0.62	0.41
	90	0.25	0.33	0.48	0.52	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.55	0.55	0.56	0.56	0.54	0.35

Figura 3 – Energia anual normalizada do SFCR sob diversos ângulos de orientação em São Paulo - SP.

Os resultados para o Rio de Janeiro – RJ estão apresentados na Fig. 4 e não há uma preferência clara em relação a orientações leste ou oeste, sendo que o desempenho é praticamente simétrico. Dentre os ângulos utilizados não houve uma orientação que resultasse em produção anual de eletricidade superior a 0,1 % em relação ao sistema de referência, porém dentro de 1% de variação há uma faixa relativamente ampla de possíveis orientações azimutais em torno do norte geográfico.

Os resultados apresentados na Fig. 5 referentes a Campo Grande indicam uma pequena vantagem energética em orientações a leste. A orientação com maior produção anual foi inclinação 25° e azimute 10°, porém também neste caso a vantagem é praticamente irrelevante, da ordem de 0,16%. O interessante no caso de Campo Grande é que embora as diferenças sejam pequenas, uma inclinação de 10° superior à latitude apresenta o mesmo resultado do sistema de

referência. Neste caso, o desempenho do sistema em telhados com inclinação eventualmente maior do que a latitude será praticamente igual ao com inclinação igual à latitude.

azimute (°)	Sul		Oeste							Norte							Leste	
	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135
ângulo de inclinação (°)	0	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
	5	0.91	0.91	0.93	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.93	0.91
	10	0.87	0.89	0.93	0.95	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.94	0.92	0.89
	15	0.84	0.86	0.92	0.95	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.91	0.86
	20	0.79	0.83	0.91	0.94	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.90	0.82
	25	0.74	0.79	0.89	0.93	0.96	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.95	0.92	0.88
	30	0.69	0.76	0.87	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.90	0.86	0.75
	35	0.64	0.72	0.85	0.90	0.94	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.88	0.71
	40	0.58	0.67	0.82	0.88	0.92	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.96	0.95	0.94	0.92	0.91	0.86	0.66
	50	0.49	0.59	0.77	0.83	0.87	0.89	0.90	0.91	0.91	0.91	0.90	0.89	0.87	0.85	0.80	0.75	0.58
	60	0.40	0.51	0.70	0.76	0.80	0.82	0.83	0.84	0.84	0.84	0.83	0.83	0.82	0.80	0.78	0.74	0.68
	70	0.33	0.44	0.63	0.69	0.73	0.74	0.74	0.75	0.74	0.74	0.74	0.73	0.73	0.72	0.71	0.67	0.61
	80	0.27	0.38	0.56	0.61	0.64	0.64	0.64	0.64	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.62	0.59	0.55
	90	0.23	0.33	0.49	0.53	0.55	0.55	0.54	0.53	0.52	0.52	0.52	0.52	0.53	0.53	0.52	0.48	0.33

Figura 4 – Energia anual normalizada do SFCR sob diversos ângulos de orientação no Rio de Janeiro - RJ.

azimute (°)	Sul		Oeste							Norte							Leste	
	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135
ângulo de inclinação (°)	0	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
	5	0.91	0.91	0.93	0.94	0.95	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.92
	10	0.88	0.89	0.92	0.94	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.95	0.94	0.90
	15	0.84	0.86	0.91	0.94	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.87
	20	0.79	0.82	0.90	0.93	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.95	0.92	0.84
	25	0.75	0.79	0.88	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.94	0.91	0.81
	30	0.69	0.75	0.86	0.90	0.94	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.93	0.89	0.77
	35	0.64	0.71	0.83	0.88	0.92	0.94	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.98	0.98	0.97	0.95	0.92	0.87
	40	0.58	0.66	0.81	0.86	0.90	0.92	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.97	0.96	0.95	0.94	0.90	0.85
	50	0.48	0.58	0.75	0.81	0.85	0.87	0.88	0.90	0.91	0.91	0.92	0.91	0.91	0.90	0.89	0.85	0.79
	60	0.40	0.51	0.69	0.75	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.84	0.84	0.84	0.83	0.82	0.79	0.73
	70	0.33	0.44	0.62	0.68	0.71	0.72	0.72	0.73	0.73	0.74	0.74	0.75	0.75	0.75	0.75	0.72	0.67
	80	0.27	0.38	0.56	0.60	0.62	0.63	0.63	0.63	0.62	0.63	0.63	0.64	0.65	0.66	0.66	0.64	0.60
	90	0.23	0.33	0.49	0.53	0.54	0.53	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.53	0.55	0.56	0.57	0.56	0.53

Figura 5 – Energia anual normalizada do SFCR sob diversos ângulos de orientação em Campo Grande - MS

Os resultados para Belo Horizonte apresentados na Fig. 6 são muito semelhantes aos de Campo Grande, tanto na produtividade anual quanto na produção do sistema em diferentes ângulos de inclinação e orientação do arranjo fotovoltaico. A diferença entre as latitudes das duas cidades é menor que 1°, porém a distância rodoviária entre as cidades é da ordem de 1300 km..

azimute (°)	Sul		Oeste							Norte							Leste	
	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135
ângulo de inclinação (°)	0	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
	5	0.90	0.91	0.93	0.94	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.91
	10	0.87	0.88	0.92	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.95	0.93	0.89
	15	0.83	0.85	0.91	0.94	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.86
	20	0.78	0.82	0.90	0.93	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.95	0.92	0.83
	25	0.73	0.78	0.88	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	0.94	0.90	0.80
	30	0.68	0.74	0.86	0.90	0.94	0.96	0.97	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.93	0.89	0.76
	35	0.62	0.70	0.84	0.89	0.93	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.92	0.87
	40	0.57	0.66	0.81	0.87	0.91	0.93	0.94	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.95	0.94	0.90	0.85
	50	0.47	0.58	0.76	0.82	0.86	0.88	0.89	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.91	0.89	0.85	0.79	0.60
	60	0.39	0.51	0.70	0.76	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.85	0.85	0.85	0.84	0.83	0.80	0.74
	70	0.32	0.44	0.64	0.69	0.72	0.73	0.74	0.74	0.75	0.75	0.76	0.76	0.77	0.76	0.76	0.73	0.67
	80	0.27	0.39	0.57	0.62	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.65	0.65	0.66	0.67	0.67	0.67	0.65	0.61
	90	0.23	0.34	0.50	0.54	0.55	0.55	0.54	0.53	0.53	0.54	0.54	0.55	0.57	0.58	0.59	0.58	0.54

Figura 6 – Energia anual normalizada do SFCR sob diversos ângulos de orientação em Belo Horizonte - MG

Os resultados apresentados na Fig. 7, referentes à cidade de Brasília mostram uma ligeira preferência a sistemas orientados a leste em relação aos sistemas orientados a oeste. É interessante notar que mesmo não sendo uma orientação considerada ideal, um sistema com orientação leste (azimute 90°) e com inclinação de 15° irá apresentar uma

energia anual produzida apenas 6% inferior em relação ao sistema de referência. Este fato é importante na hora de tomada de decisão de investimento, pois para uma casa com telhados que possuem águas apenas na direção leste-oeste, o desempenho anual do sistema ainda pode ser satisfatório, dependendo dos parâmetros econômicos utilizados para a análise de viabilidade.

azimute		Sul		Oeste							Norte							Leste	
(°)		180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135
ângulo de inclinação (°)	0	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	5	0.93	0.93	0.95	0.95	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.93
	10	0.90	0.91	0.94	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.91
	15	0.86	0.88	0.93	0.95	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.96	0.94	0.89
	20	0.82	0.85	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.96	0.93	0.86
	25	0.78	0.82	0.90	0.93	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.95	0.91	0.83
	30	0.73	0.78	0.88	0.92	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.93	0.89	0.79
	35	0.67	0.74	0.85	0.90	0.93	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.95	0.91	0.87	0.75
	40	0.62	0.70	0.83	0.87	0.91	0.92	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.93	0.89	0.85	0.71
	50	0.51	0.62	0.77	0.82	0.85	0.87	0.88	0.89	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.88	0.87	0.84	0.79	0.63
	60	0.42	0.54	0.71	0.76	0.79	0.80	0.80	0.81	0.81	0.82	0.82	0.82	0.82	0.81	0.80	0.77	0.73	0.54
	70	0.35	0.47	0.64	0.68	0.70	0.71	0.71	0.71	0.72	0.72	0.72	0.73	0.73	0.73	0.73	0.70	0.66	0.47
	80	0.29	0.40	0.57	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61	0.60	0.61	0.61	0.62	0.63	0.64	0.64	0.63	0.59	0.41
	90	0.24	0.35	0.50	0.53	0.53	0.52	0.51	0.50	0.50	0.50	0.51	0.51	0.53	0.54	0.55	0.55	0.52	0.35

Figura 7 – Energia anual normalizada do SFCR sob diversos ângulos de orientação em Brasília - DF

A Fig. 8 apresenta os resultados obtidos para Bom Jesus da Lapa – BA. Esta região está entre as que apresentam os maiores índices de irradiação do território brasileiro. Este fato reflete-se no alto valor da produtividade anual e do fator de capacidade apresentado na Tab. 1. A faixa de inclinações em que a diferença de produção anual é até 1 % menor que a produção de referência é bastante ampla. A simulação indicou que a inclinação de 20° e orientação azimutal de 20° apresentam o melhor desempenho anual, aproximadamente 0,5 % superior ao sistema de referência. Neste caso também é possível visualizar claramente uma tendência dos sistemas orientados ao leste apresentarem desempenho superior aos sistemas orientados ao oeste. Poderia se argumentar inclusive, que no caso de grandes sistemas, uma inclinação de 10°, o que permite um grande fator de cobertura do solo, e azimute ligeiramente voltado para o leste, entre 10 e 30°, teria um desempenho semelhante ao sistema orientado exatamente para o norte.

azimute		Sul		Oeste							Norte							Leste	
(")		180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135
ângulo de inclinação (°)	0	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
	5	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.95
	10	0.92	0.92	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.94
	15	0.89	0.90	0.93	0.95	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.96	0.92
	20	0.85	0.86	0.92	0.94	0.97	0.98	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.89
	25	0.80	0.83	0.90	0.93	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.94	0.86
	30	0.76	0.79	0.87	0.91	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.96	0.93	0.83
	35	0.70	0.75	0.85	0.88	0.91	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.94	0.91	0.79
	40	0.65	0.71	0.82	0.86	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.92	0.88	0.75
	50	0.53	0.63	0.76	0.80	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.87	0.88	0.89	0.89	0.89	0.89	0.87	0.83	0.67
	60	0.44	0.54	0.70	0.73	0.76	0.76	0.77	0.77	0.78	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.82	0.80	0.77	0.59
	70	0.36	0.47	0.63	0.66	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.68	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.73	0.70	0.51
	80	0.29	0.40	0.56	0.59	0.59	0.58	0.57	0.56	0.56	0.56	0.57	0.59	0.61	0.63	0.65	0.66	0.63	0.44
	90	0.24	0.35	0.50	0.52	0.51	0.49	0.47	0.46	0.46	0.46	0.47	0.49	0.51	0.54	0.56	0.58	0.55	0.38

Figura 8 – Energia anual normalizada do SFCR sob diversos ângulos de orientação em Bom Jesus da Lapa - BA

Para uma cidade com a latitude de Fortaleza – CE, os resultados apresentados na Fig. 9 são interessantes sob diversos aspectos. Nesta latitude, a orientação norte não é tão relevante, uma vez que em praticamente metade do ano o Sol estará ao sul do zênite local. Interessante notar também que na inclinação de 10°, há várias orientações azimutais a oeste que inclusive apresentam desempenho 1% superior ao sistema de referência. Isto permite a instalação de sistemas fotovoltaicos em qualquer água de um telhado com praticamente a mesma produção anual de eletricidade, salvo obviamente eventuais sombreamentos. Convém destacar também que embora o sistema de referência tenha sido calculado com inclinação igual à latitude local de 3,78°, com o objetivo de manter a consistência das comparações, é aconselhável uma inclinação mínima recomendada pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos de 10° a fim de facilitar a autolimpeza. (YINGLI, 2011).

Para a cidade de Manaus-AM os dados são apresentados na Fig. 10. Embora a latitude de Manaus e Fortaleza seja semelhante, obviamente os climas são distintos. É interessante notar que dentre as cidades analisadas, a produtividade fotovoltaica anual de Manaus só não é menor do que a de Curitiba, porém a taxa de desempenho do sistema é a menor dentre as cidades analisadas, uma vez que a cidade possui clima quente, o que prejudica o

desempenho do sistema fotovoltaico. Sob o ponto de vista do ângulo de inclinação e da orientação, os resultados são similares ao de Fortaleza-CE, destacando a inclinação de 10° e azimuth de 320° que teria uma produção anual simulada ligeiramente superior ao sistema de referência respeitando inclusive a inclinação mínima recomendada.

azimute (°)	Sul		Oeste							Norte							Leste	
	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135
ângulo de inclinação (°)	0	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
	5	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99
	10	0.98	0.99	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97
	15	0.96	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.96	0.96
	20	0.94	0.96	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.94	0.93
	25	0.91	0.94	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	0.92	0.90
	30	0.87	0.92	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91	0.90	0.87
	35	0.83	0.89	0.93	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.90	0.90	0.89	0.89	0.88	0.88	0.87	0.86
	40	0.79	0.85	0.91	0.91	0.91	0.90	0.89	0.88	0.87	0.87	0.86	0.86	0.85	0.85	0.84	0.83	0.79
	50	0.68	0.77	0.85	0.85	0.84	0.83	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.76	0.71
	60	0.57	0.69	0.77	0.78	0.75	0.74	0.72	0.70	0.68	0.67	0.67	0.67	0.68	0.69	0.70	0.69	0.62
	70	0.48	0.60	0.70	0.70	0.67	0.64	0.62	0.59	0.57	0.56	0.56	0.56	0.57	0.59	0.60	0.62	0.53
	80	0.39	0.51	0.62	0.61	0.58	0.55	0.52	0.49	0.47	0.46	0.46	0.47	0.48	0.50	0.52	0.54	0.45
	90	0.32	0.44	0.54	0.53	0.49	0.46	0.43	0.40	0.39	0.38	0.38	0.38	0.40	0.42	0.44	0.47	0.39

Figura 9 – Energia anual normalizada do SFCR sob diversos ângulos de orientação em Fortaleza – CE.

azimute (°)	Sul		Oeste							Norte							Leste	
	180	225	270	290	310	320	330	340	350	0	10	20	30	40	50	70	90	135
ângulo de inclinação (°)	0	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
	5	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
	10	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98
	15	0.96	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.96
	20	0.94	0.96	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96	0.95	0.94
	25	0.91	0.94	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.91
	30	0.87	0.91	0.95	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92	0.91	0.88
	35	0.84	0.88	0.92	0.93	0.93	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.89	0.88	0.85
	40	0.79	0.85	0.90	0.91	0.91	0.90	0.90	0.89	0.89	0.88	0.88	0.87	0.87	0.87	0.86	0.85	0.81
	50	0.69	0.77	0.84	0.85	0.84	0.83	0.83	0.82	0.81	0.80	0.80	0.80	0.79	0.79	0.80	0.79	0.73
	60	0.59	0.69	0.77	0.78	0.76	0.75	0.74	0.72	0.71	0.70	0.70	0.70	0.71	0.71	0.72	0.72	0.65
	70	0.49	0.60	0.70	0.70	0.68	0.66	0.64	0.62	0.61	0.60	0.60	0.60	0.61	0.62	0.63	0.65	0.56
	80	0.41	0.52	0.62	0.62	0.59	0.57	0.54	0.52	0.51	0.50	0.50	0.50	0.52	0.54	0.55	0.57	0.48
	90	0.35	0.45	0.54	0.54	0.51	0.48	0.46	0.43	0.42	0.41	0.41	0.42	0.43	0.45	0.47	0.50	0.41

Figura 10 – Energia anual normalizada do SFCR sob diversos ângulos de orientação em Manaus – AM.

4. CONCLUSÕES

A análise realizada por meio de uma simulação computacional de um sistema fotovoltaico e não somente da radiação incidente no plano inclinado permite o cálculo do impacto da orientação do arranjo no desempenho global do sistema, incluindo os efeitos secundários da temperatura e do ponto de operação do inversor. Em geral há uma faixa relativamente ampla de inclinações e orientações azimutais do arranjo fotovoltaico em que a produção anual de eletricidade não difere em mais do que 1% da energia produzida por um sistema de referência, com inclinação igual à latitude e orientado para o norte geográfico. Este fato minimiza a necessidade de realizar modificações no telhado ou nos suportes dos módulos para a maioria dos casos de instalações residenciais. A escolha de uma inclinação diferente da considerada ideal para aplicações fotovoltaicas pode apresentar o mesmo desempenho anual, havendo casos inclusive em que a produção pode ser maior do que um sistema precisamente orientado.

É importante destacar que não há uma regra geral que se aplica a todas as cidades, primeiramente por questões evidentes relacionadas à extensão do país. Se as águas disponíveis forem leste/oeste, a simulação permite decidir o melhor caso baseado na energia anual produzida. Nas baixas latitudes praticamente qualquer orientação azimutal produz resultados semelhantes para ângulos de inclinação de 10°. É importante ressaltar que os resultados das simulações aqui apresentadas necessitam de arquivos climáticos representativos dos locais de interesse. A criação de uma rede de medidas de dados solarimétricos contendo a radiação difusa e direta normal, além das variáveis ambientais, é essencial para os modelos de desempenho de sistemas fotovoltaicos terem resultados confiáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UERGS (Universidade Estadual do Rio Grande do Sul), ao CNPq e ao INCT (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia) pelo apoio na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Blair, N. A., Dobos, A., Sather, N., 2012. Case Studies Comparing System Advisor Model (SAM) Results to Real Performance Data. Presented at the 2012 World Renewable Energy Forum Denver, Colorado May 13-17, 2012.
- Blair N., Mehos M., Christensen C., 2008. Modeling Photovoltaic and Concentrating Solar Power Trough Performance, Cost, and Financing with the Solar Advisor Model. Presented at SOLAR 2008 - American Solar Energy Society (ASES) San Diego, California May 3–8, 2008.
- Dobos A., Gilman P., Kasberg M., 2012. P50/P90 Analysis for Solar Energy Systems Using the System Advisor Model Presented at the 2012 World Renewable Energy Forum Denver, Colorado May 13-17.
- EPE (Empresa de Pesquisa Energética), 2015 – Nota técnica EPE-DEE-NT-150/2014-r0 de 21 de novembro de 2014 – Expansão da Geração 1º LEILÃO DE ENERGIA DE RESERVA DE 2014 Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral.
- EPE (Empresa de Pesquisa Energética), 2015 – Nota técnica EPE-DEE-127/2015-r0 de 24 de setembro de 2015 – Expansão da Geração 1º LEILÃO DE ENERGIA DE RESERVA DE 2015 Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral.
- IEA (International Energy Agency), 2014 – Snapshot of Global PV Markets – PVPS – Photovoltaic Power System Programme -Report IEA PVPS T1-26:2015
- Kormann, L., Peroza, J., Silva, J. E., Rampinelli, G. A., Desenvolvimento de mapas de avaliação do desempenho de sistemas fotovoltaicos em diferentes ângulos de inclinação e de azimuth. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 18, pp.04.01-04.08, 2014. Impreso en la Argentina. ISSN 2314-1433 - Trabajo seleccionado de Actas ASADES 2014
- Lalwani M., Kothari D.P., Singh M., 2010. Investigation of Solar Photovoltaic Simulation Softwares. *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED ENGINEERING RESEARCH*, DINDIGUL Volume 1, No 3, 2010.
- Marinoski, Deivis Luis; Salamoni, Isabel Tourinho, Rüther, Ricardo, 2004. Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do CREA-SC. I conferência latino-americana de construção sustentável e X encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. 18-21 julho 2004, São Paulo. ISBN 85-89478-08-4.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2011. NREL's System Advisor Model Simplifies Complex Energy Analysis (Fact Sheet), The Spectrum of Clean Energy Innovation, NREL/FS-6A42-49150.
- Ordenez, M., Marinoski, D. L., Braun, P., Rüther, R. (2007) The impact of building-integrated photovoltaics on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil. *Energy and Buildings* 39 (2007) 629–642.
- RETSCREEN, 2014 - Pacote de software RETScreen – Disponível em <http://www.etscreen.net/pt/home.php>.
- Rüther R., Braun P., 2009. Energetic contribution potential of building-integrated photovoltaics on airports in warm climates. *Solar Energy* 83 (2009) 1923–1931.
- Rüther R., Zilles R., 2011. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil, *Energy Policy* 39 (2011) 1027–1030.
- Rüther, R., Knob P. J., Jardim, C., Rebechi, S., 2008. Potential of building integrated photovoltaic solar energy generators in assisting daytime peaking feeders in urban areas in Brazil *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 1074–1079.
- Rüther R.; Salamoni, I.; Montenegro, A.; Braun, P.; Devienne Filho, R., 2008. Programa de telhados solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica pública no Brasil. XII encontro nacional de tecnologia do ambiente construído 7 a 10 de outubro de 2008.
- SAM – System advisor model – NREL (National Renewable Energy Laboratory). Disponível em <https://sam.nrel.gov/>.
- YINGLI SOLAR PV MODULES, 2011- Installation and user manual. Disponível em <http://www.yinglisolar.com/>, acesso em 20 de outubro de 2015.

PERFORMANCE OF A GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN TEN BRAZILIAN CITIES WITH SEVERAL PANEL ORIENTATIONS

Abstract. Grid connected photovoltaic systems are becoming viable in Brazil. The project, analysis and dimensioning of such systems is usually performed with the aid of computer simulation programs. A simple analysis does permit to study impact of different variables, including the influence of tilt angle and azimuth angle on the annual energy generated by the system. The computer tool developed by NREL, SAM (System Advisor Model) was used to simulate a grid connected photovoltaic system of 1500 W in ten Brazilian cities. The tilt angle was varied from 0 to 90° and the azimuth angle was varied 360° covering the most important angles. The results indicated a considerable range of angles where the annual energy varies around 1% comparing to the standard orientation, i.e., the panel pointing north and tilt angle set to the local latitude. The methodology can be employed to verify if the east or west orientation is preferable. The results are obtained using a climate file as input, and the simulation performance of the system includes all components, not only the available solar energy at the particular angle. There are no general answers to the best angle valid in all cases; therefore each one must be simulated with a reliable climate file with solar radiation data from several years. The demand of solarimetric stations around the country is mandatory to improve the reliability of the photovoltaic projects.

Key words: Solar Energy, Photovoltaic system, tilt angle.